

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroniky**

**Aplikace řídicího systému pro výkonovou jednotku střídače**  
**Control System Application for Power Converter Unit**

**2016**

**Radomír Vasický**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroniky

## Zadání bakalářské práce

Student: **Radomír Vasický**  
Studijní program: B2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 2612R003 Aplikovaná elektronika  
Téma: **Aplikace řídicího systému pro výkonovou jednotku střídače**  
**Control System Application for Power Converter Unit**  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rozbor funkce a způsobů řízení trojfázového střídače.
2. Navrhněte a realizujte řídicí systém pro jednotku střídače dle pokynů vedoucího práce.
3. Na střídači proveďte ověření funkce řídicího systému a změřte průběhy nejdůležitějších veličin.

Seznam doporučené odborné literatury:

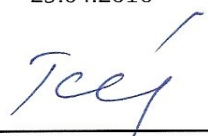
Dle pokynů vedoucího závěrečné práce.


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Sobek, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty



## **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 26. Dubna 2016

  
podpis studenta

## **Poděkování**

Rád bych tímto poděkoval panu Ing. Martinu Sobkovi, Ph.D. za odbornou pomoc a cenné rady při realizaci této bakalářské práce. Také bych chtěl poděkovat své rodině za podporu během mého studia.

## **Abstrakt**

Cílem bakalářské práce je aplikace řídicího systému pro výkonovou jednotku střídače. Práce se skládá ze stručného teoretického rozboru funkce napěťových střídačů a jejich způsobů řízení. Dále je popsán návrh a realizace řídicího systému a popis použitého vývojového kitu MC56F8037EVM. Část je také věnována seznámení se s programovým vybavením řídicího systému. V závěrečné části je připojením řídicího systému ke střídači a měřeními ověřena jeho funkčnost.

## **Klíčová slova**

Codewarrior, Digitální signálový kontrolér, Freemaster, MC56F8037EVM, Měníč kmitočtu, PWM řízení, Řídicí systém, Skalární řízení, Trojfázový střídač.

## **Abstract**

The goal of the bachelor's thesis is the application of control system for a power converter unit. This thesis consists of a brief theoretical function analysis of a three-phase voltage converter and its control methods. Furthermore, the design and realization of the control system as well as the used development kit MC56F8037EVM are described. Part of this work is also devoted to familiarization with the software of control system. Last part of this thesis checks functionality of the control system by connecting it to the converter and measuring.

## **Key Words**

Codewarrior, Control System, Digital Signal Controller, Freemaster, Frequency converter, MC56F8037EVM, Frequency Converter, PWM Control, Scalar control, Three-Phase Converter.

# Obsah

Seznam použitých symbolů.....	- 6 -
Seznam použitých zkratek.....	- 7 -
Seznam ilustrací a seznam tabulek.....	- 8 -
Úvod.....	- 10 -
1 Střídače.....	- 11 -
1.1 Rozdělení střídačů.....	- 11 -
1.2 Možnosti zapojení střídačů .....	- 11 -
1.3 Trojfázové napěťové střídače.....	- 12 -
1.3.1 Průchod výkonů.....	- 13 -
1.3.2 Vliv zpětných diod .....	- 13 -
1.4 Řízení trojfázového střídače.....	- 15 -
1.4.1 Obdélníkové řízení .....	- 15 -
1.4.2 PWM .....	- 16 -
2 Měníče kmitočtu.....	- 19 -
2.1 Nepřímé měniče kmitočtu napěťového typu.....	- 19 -
2.2 Realizovaný nepřímý měnič kmitočtu s hybridním modulem .....	- 20 -
3 Návrh a realizace řídicího systému .....	- 21 -
3.1 Vývojový kit MC56F8037EVM .....	- 21 -
3.2 Napájecí zdroj .....	- 23 -
3.3 Řízení hybridního modulu střídače .....	- 24 -
3.4 Úprava signálu z výstupu čidel LEM.....	- 24 -
3.5 LCD displej .....	- 26 -
3.6 Potenciometry .....	- 28 -
4 Programové vybavení řídicího systému .....	- 29 -
4.1 Komunikace s PC.....	- 32 -
5 Ověření funkce řídicího systému.....	- 33 -
Závěr .....	- 40 -
Použitá literatura .....	- 41 -
Seznam příloh.....	- 42 -

## Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
$\psi$	°	Programový úhel
$\psi_R$	°	Úhel sepnutí zpětných diod
$\psi_S$	°	Skutečný úhel sepnutí polovodičových součástek
$A_1$	V	Amplituda napětí základní harmonické
$A_{1m}$	V	Základní harmonická výstupního napětí střídače při dané modulaci
$A_{10\%}$	V	Základní harmonická výstupního napětí střídače při obdélníkovém řízení
$I_d$	A	Střední hodnota proudu
$i_d$	A	Okamžitá hodnota proudu
$I_F$	A	Proud v propustném směru
$I_{PN}$	A	Jmenovitá hodnota měřeného proudu čidel LEM
$I_{rms}$	A	Efektivní hodnota proudu
$m$	-	Modulační poměr
$P_d$	W	Výkon dodávaný zátěži
$p$	W	Okamžitý výkon
$R$	$\Omega$	Rezistor
$U_{CEsat}$	V	Saturační napětí tranzistoru
$U_d$	V	Napětí zdroje
$U_{dc}$	V	Napětí v meziobvodu
$U_F$	V	Napětí v propustném směru
$U_{H01}$	V	Efektivní hodnota první harmonické
$U_m$	V	Úbytek napětí na měřicím rezistoru
$U_{out}$	V	Výstupní napětí
$U_{ref}$	V	Referenční napětí
$U_{rms}$	V	Efektivní hodnota napětí
$U_z$	V	Žádaná hodnota napětí

## Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
<b>A/D</b>	Analogově digitální převodník
<b>CPM</b>	Comparators
<b>D/A</b>	Digitálně analogový převodník
<b>EMC</b>	Electromagnetic Compatibility
<b>EOnCE</b>	Enhanced On-Chip Emulation
<b>GPIO</b>	General Purpose Input/Output
<b>GTO</b>	Gate Turn-Off Thyristor
<b>I<sup>2</sup>C</b>	Inter-Integrated Circuit
<b>IGBT</b>	Insulated Gate Bipolar Transistor
<b>IGCT</b>	Integrated Gate Commutated Thyristor
<b>JTAG</b>	Join Test Action Group
<b>LED</b>	Light Emitting Diode
<b>PC</b>	Personal Computer
<b>PIT</b>	Programmable Interval Timer
<b>PWM</b>	Pulse Width Modulation
<b>QSCI</b>	Queued Serial Communication Interface
<b>QSPI</b>	Queued Serial Peripheral Interface
<b>RAM</b>	Random Access Memory
<b>SCI</b>	Serial Communication Interface

## Seznam ilustrací a seznam tabulek

Číslo ilustrace	Název ilustrace	Číslo stránky
1.1	Trojfázový střídač v můstkovém zapojení s odporovou zátěží	11
1.2	Trojfázový střídač v můstkovém zapojení s reálnou zátěží	11
1.3	Průchod činného a jalového výkonu	12
1.4	Vliv vedení zpětné diody	13
1.5	Průběhy výstupního napětí pro různé programové úhly	15
1.6	Porovnávání sinusového signálu s pilovitým k vytvoření pulsně šířkové modulace	16
1.7	Deformace modulačního signálu 3. Harmonickou	17
2.1	Blokové schéma nepřímého měniče napětíového typu	18
2.2	Blokové schéma výkonové jednotky	19
3.1	Blokové schéma řídicího systému s připojením k výkonové jednotce střídače	21
3.2	Spínaný zdroj MEAN WELL RS-15-5	23
3.3	Zapojení regulátoru napětí LF33CV	22
3.4	Zapojení tranzistoru pro PWM	23
3.5	Zapojení rozdílového operačního zesilovače k úpravě signálu z výstupu čidla LEM	24
3.6	Zapojení napětíové reference TLV431	25
3.7	Zapojení LCD displeje NMTC-S16205DFGHSAY	26
3.8	Ukázka zobrazení hodnot na displeji	27
3.9	Zapojení potenciometru	27
4.1	První část vývojového diagramu s nekonečnou smyčkou a přerušením pro obnovu displeje	29
4.2	Druhá část vývojového diagramu s přerušením pro nastavení A/D převodníku a vytváření PWM	30
4.3	Prostředí programu FreeMASTER	32
5.1	Závislost $U_{HO1}$ na $f$	35
5.2	Závislost $I_{rms}$ na $f$	36



<b>5.3</b>	Závislost $U_{HO1}$ a $I_{rms}$ na $U_{dc}$	36
<b>5.4</b>	Průběh výstupního fázového napětí a proudu při $f = 25$ Hz	37
<b>5.5</b>	Průběh výstupního fázového napětí a proudu při $f = 50$ Hz	37
<b>5.6</b>	Průběh výstupního fázového napětí a proudu při $f = 100$ Hz	38
<b>5.7</b>	Průběh výstupního fázového napětí a proudu s napětím v meziobvodu $U_{dc} = 325$ V	38
<b>5.8</b>	Průběh výstupního fázového napětí a proudu s napětím v meziobvodu $U_{dc} = 250$ V	39
<b>5.9</b>	Průběh výstupního fázového napětí a proudu s napětím v meziobvodu $U_{dc} = 200$ V	39

<b>Číslo tabulky</b>	<b>Název tabulky</b>	<b>Číslo stránky</b>
<b>2.1</b>	Popis pinů displeje	28
<b>5.1</b>	Štítkové parametry motoru	33
<b>5.2</b>	Naměřené hodnoty při napětí v meziobvodu $U_{dc} = 100$ V	33
<b>5.3</b>	Naměřené hodnoty při napětí v meziobvodu $U_{dc} = 200$ V	34
<b>5.4</b>	Naměřené hodnoty při napětí v meziobvodu $U_{dc} = 325$ V	34
<b>5.5</b>	Naměřené hodnoty při ověřování skalárního řízení se změnou napětí v meziobvodu	35

## Úvod

Bakalářská práce se skládá z pěti kapitol. V první se budu zabývat funkcí trojfázových napěťových střídačů a následně i jejich způsoby řízení. Druhá kapitola se bude týkat jak rozdělení měničů kmitočtu a popisu jejich funkce, tak popisem realizovaného měniče kmitočtu. Následující kapitola bude zahrnovat popis základních vlastností použitého vývojového kitu MC56F8037EVM a návrh jednotlivých obvodů řídicího systému. Čtvrtá kapitola bude zaměřena na popis programu řídicího systému pomocí vývojového diagramu. V závěrečné části se budu věnovat ověřování funkčnosti řídicího systému připojením k výkonové jednotce střídače a měření výstupního průběhu napětí a proudu při různých výstupních frekvencích.

Tato práce navazuje na práci z roku 2015, v které byla realizována výkonová jednotka střídače, ale bez řídicího systému. Cílem práce je tedy vytvořit řídicí systém pro tuto výkonovou jednotku střídače, který bude umožňovat nastavení výstupní frekvence a výstupního napětí, zpracovávat změřené napětí v meziobvodu a změřený proud ve dvou fázích, z kterých následně vypočte amplitudu fázového proudu. Dále bude umožňovat skalární řízení asynchronního motoru a také řízení pomocí PC přes program Freemaster.

# 1 Střídače

Střídače jsou měniče, které pracují převážně ve střídačovém chodu. Využívají se k přeměně stejnosměrné energie na střídavou. Skládají se tedy ze stejnosměrné a střídavé strany. K přeměně stejnosměrné energie na střídavou využívají polovodičové součástky, které jsou periodicky spínány a rozepínány. Nejvyužívanější součástky jsou IGBT, IGCT a diody.[2]

Střídače nalézají uplatnění jako záskokové zdroje pro napájení důležitých střídavých spotřebičů z náhradních zdrojů. Nejvíce se používají v měničích kmitočtu, které napájí například asynchronní motor. Běžný rozsah výstupních kmitočtů je od desetin Hz do stovek Hz.[1]

## 1.1 Rozdělení střídačů

Na základě charakteru napájecího zdroje rozdělujeme střídače na napěťové a proudové.[1]

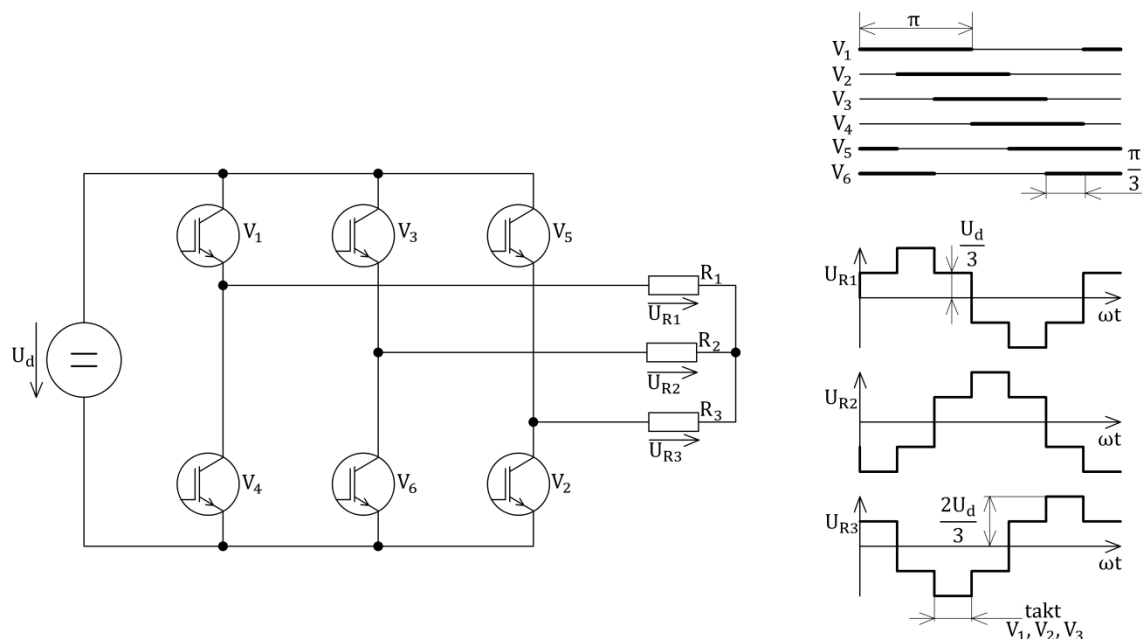
- Napěťové – jsou napájeny zdrojem napětí, který je realizován pomocí baterie nebo usměrněného napětí ze sítě s filtračním kondenzátorem o velké kapacitě.[1]
- Proudové – jsou napájeny zdrojem proudu, který je realizován usměrněním proudu ze sítě a poté vyfiltrován tlumivkou o velké indukčnosti.[1]

## 1.2 Možnosti zapojení střídačů

Napěťové i proudové střídače lze zapojit jednofázově nebo trojfázově a to v můstkovém nebo uzlovém zapojení. Uzlové zapojení se v praxi příliš nevyužívá, proto bude dále popisováno jen zapojení můstkové.[2]

- Jednofázové – v ideálním případě (činná odporová zátěž) jsou tvořeny čtyřmi polovodičovými vypínatelnými součástkami.[2]
- Trojfázové – v ideálním případě jsou tvořeny šesti vypínatelnými polovodičovými součástkami. Tyto vypínatelné součástky mohou být spínány v rozmezí elektrického úhlu  $\frac{\pi}{3} - \pi$ . Při spínání součástek v rozmezí úhlu  $\frac{\pi}{3}$  a menších by neprocházela obvodem proud z důvodu sepnutí pouze jedné součástky. Při elektrickém úhlu  $\pi$  a vyšších by naopak docházelo ke zkratu, protože by sepnuly obě dvě součástky v jedné větvi. Pokud je střídač provozován s úhlem sepnutí  $\pi$ , dochází k sepnutí tří součástek. Aby nedocházelo ke zkratu, tedy k sepnutí dvou součástek v jedné fázi, musí být při řízení elektrickým úhlem  $\pi$  vybaven střídač ochrannými dobami mezi sepnutím těchto dvou součástek. K průchodu proudu střídačem dojde pouze tehdy, je-li sepnuta jedna součástka z anodové skupiny a jedna z katodové. Na obrázku 1.1 je zobrazeno můstkové zapojení trojfázového střídače a spínací diagram při obdélníkovém řízení pro úhel  $180^\circ$ . Začátky intervalů na spínacím diagramu jsou od sebe navzájem posunuty o  $\frac{\pi}{3}$ . [2]

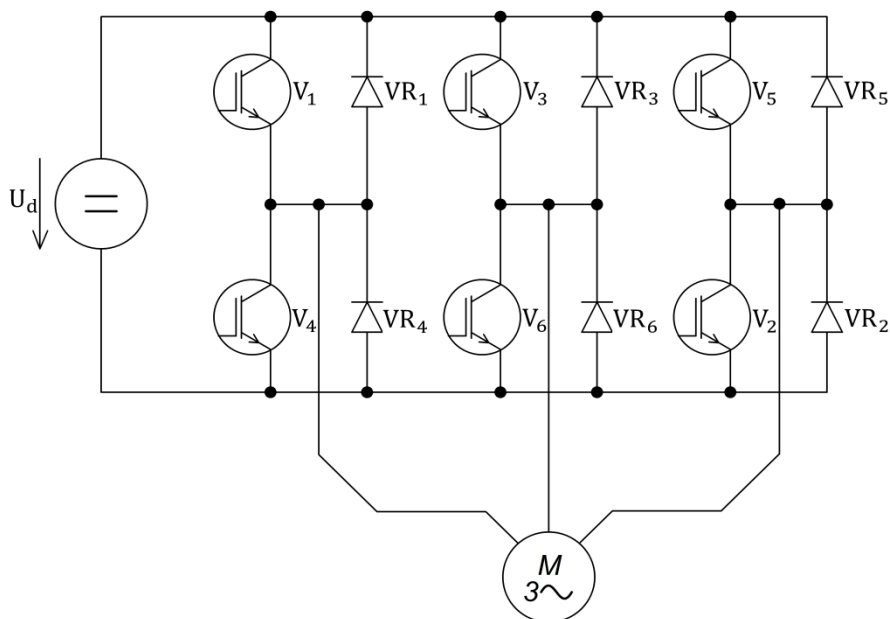
Tato zapojení byla popsána pouze s činnou odporovou zátěží. Protože reálné zátěže nejsou jen čistě odporové, ale obsahují i indukčnost, je nutné tato zapojení upravit. Tyto úpravy jsou závislé na charakteru napájecího zdroje střídače.[2]



Obrázek 1.1: Trojfázový střídač v můstkovém zapojení s odporovou zátěží

### 1.3 Trojfázové napěťové střídače

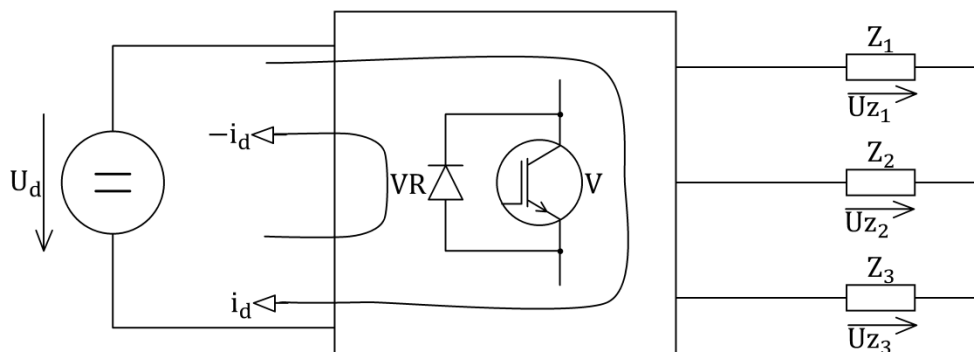
Napěťové trojfázové střídače se skládají z šesti vypínatelných součástek. Z důvodu napěťového zdroje umístěného na jeho stejnosměrné straně a reálné induktivní zátěži musí být střídač vybaven zpětnými diodami, protože napěťový zdroj umožňuje průchod proudu oběma směry. Zpětné diody jsou antiparalelně připojeny k vypínatelným součástkám. Na obrázku 1.2 je zobrazeno zapojení trojfázového napěťového střídače v můstkovém zapojení s připojenou reálnou zátěží, kterou představuje asynchronní motor.[2]



Obrázek 1.2: Trojfázový napěťový střídač v můstkovém zapojení s reálnou zátěží

### 1.3.1 Průchod výkonů

Kvůli reálné indukivní zátěži dochází ve střídači ke vzniku činné a jalové složky výkonu.[2] Průchody výkonů jsou vysvětleny na obrázku 1.3, který zobrazuje střídač s napájecím napětovým zdrojem a reálnou zátěží.



Obrázek 1.3: Průchod činného a jalového výkonu

Na obr. 1.3 se uvažuje konstantní zdroj napětí  $U_d$ . Při střední hodnotě stejnosměrného proudu  $I_d$  je pak výkon odebíraný zdroji  $U_d$  a dodávaný zátěži[1]:

$$P_d = U_d \cdot I_d \quad (1.1)$$

Z neměnné polarity napájecího zdroje  $U_d$  vyplývá, že se změnou smyslu výkonu  $P_d$  dochází ke změně polarity proudu  $I_d$ . U trojfázového střídače může ke změnám polarity proudu docházet při větším odběru jalového výkonu. Při menších odběrech dochází pouze k jeho zvlnění, které je závislé na velikosti jalového výkonu.[2]

$$P > 0 \Rightarrow I_d > 0 \dots \text{střídačový chod}$$

$$P < 0 \Rightarrow I_d < 0 \dots \text{usměrňovací chod}$$

Dále je okamžitá hodnota výkonu odebíraného ze stejnosměrného zdroje dána pomocí vztahu [1]:

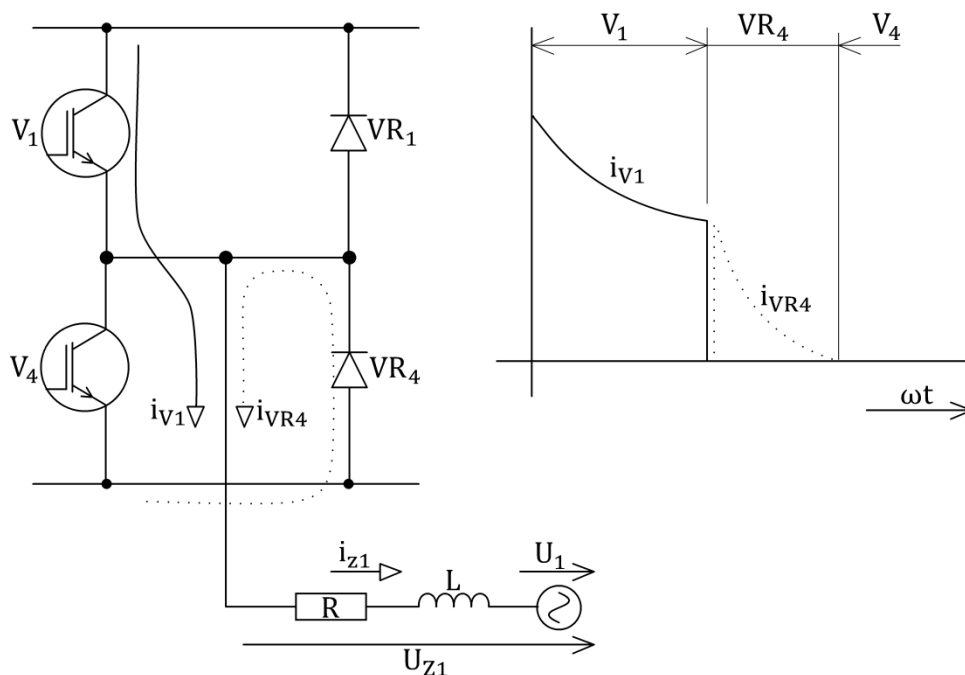
$$p = U_d \cdot i_d = \sum_{n=1}^m p_n \quad (1.2)$$

v němž  $i_d$  je okamžitá hodnota proudu ve stejnosměrném obvodu,  $p_n$  je okamžitá hodnota výkonu odebíraného  $n$ -tou fází  $m$ -fázové zátěže.[1]

Pokud je proud  $I_d > 0$  je umožněn jeho průchod přes vypínatelné součástky do zátěže. Pokud je  $I_d < 0$ , tak se přes zpětné diody vrací zpět do zdroje. Zpětné diody tvoří zpětný usměrňovač. Zpětný usměrňovač umožňuje usměrňovací chod a odběr jalového výkonu zátěží.[1]

### 1.3.2 Vliv zpětných diod

K projevení zpětných diod musí být připojena reálná zátěž, která obsahuje indukčnost. Pokud dojde k sepnutí zpětné diody, tak je na antiparalelně připojeném spínači udržováno závěrné napětí. Tím může spínač sepnout až v době, kdy diodou neprochází proud. Na obrázku 1.4 lze pozorovat průběh proudu při vypnutí vypínatelné součástky  $V_1$  a dozívající proud zpětné diody.[1]



Obrázek 1.4: Vliv vedení zpětné diody

Při sepnutí součástce  $V_1$  prochází proud do zátěže. Pokud dojde k rozepnutí  $V_1$ , tak proud doznívá v původním smyslu přes diodu  $VR_4$ . Doba sepnutí této zpětné diody je závislá na zátěži.[1]

Zpětné diody mají také vliv na výstupní průběh napětí. Zde záleží na úhlu sepnutí  $\psi$  antiparalelně zapojeného spínače. Pokud je  $\psi = \pi$ , tak je programový úhel složen z  $\psi_s$  a  $\psi_R$ , kde  $\psi_R$  je úhel sepnutí zpětných diod a  $\psi_s$  je skutečný úhel sepnutí polovodičových součástek. Při  $\psi = \pi$  platí tedy vztah[1]:

$$\psi = \psi_R + \psi_s \quad (1.3)$$

To znamená, že část programového úhlu je sepnuta zpětná dioda a část vede proud spínač. Tím se nemění výstupní křivka napětí, protože není závislá na době vedení zpětných diod. Z toho vyplývá, že výstupní průběh napětí není závislý na parametrech zátěže.[1]

Při  $\psi < \pi$  dochází k zasahování intervalu vedení zpětných diod mimo programovatelný úhel antiparalelně připojených spínačů. Tím dochází ke změně výstupní křivky napětí v závislosti na parametrech zátěže.[1]

## 1.4 Řízení trojfázového střídače

Hlavním důvodem řízení trojfázových střídačů je snaha o přesné generování zadaného průběhu výstupní veličiny, kterou může být proud nebo napětí, a současnou změnu dalších parametrů jako je frekvence, velikost základní harmonické složky a tvar křivky u nesinusového průběhu. Řízení střídače lze realizovat několika typy modulací, například obdélníkovým řízením (six-step modulation) nebo PWM (pulse width modulation).[3]

Modulace pro střídače můžeme dále rozdělit na dopředná schémata (Feedforward Schemes), PWM s nosnou vlnou (Carrier-Based PWM), PWM bez nosné vlny (Carrierless PWM) a zpětnovazební schémata (Feedback PWM-Control). Volba modulace závisí na použitém typu stroje a jeho výkonu.[3]

Jednotlivé modulační algoritmy musí splňovat určité spínací podmínky, kterými jsou minimální doby sepnutí a minimální doby vypnutí.[3]

Například při nedodržení minimální doby sepnutí u GTO tyristorů by docházelo k tomu, že na částečně otevřenou součástku by byly přivedeny vypínací impulzy, které by se uzavíraly přes menší plochu, a docházelo by tak k tepelnému přetěžování s následnou destrukcí. Vypínací doby jsou dané typem součástky a pohybují se do 100  $\mu$ s, u IGBT okolo 10  $\mu$ s. Stejně tak při nedodržení minimální doby vypnutí by mohlo dojít k destrukci součástek a to kvůli tomu, že při vypínání by nedocházelo k obnově jejich blokovacích schopností. Součástka by zůstala sepnutá a došlo by ke zkratu v jedné větvi a tím k přetížení součástek. Zkratu lze zabránit vložením ochranných dob mezi sepnutí spínačů v téže větvi.[3]

Z toho plyne další důležitý parametr, kterým je dovolený spínací kmitočet, který závisí na typu použitých součástek. Při použití GTO tyristorů se může pohybovat až k několika set Hz. U IGBT tranzistorů dosahuje spínací kmitočet hodnot od 1 kHz a výše. Pokud ale spínací kmitočet dosahuje velkých hodnot, může dojít k problému s EMC.[3]

Dále musí být modulace optimalizované a to tak, aby eliminovaly nebo snížily vyšší harmonické složky v generovaném napětí. Tím by měl být výstupní proud rovnoměrně zvlněný bez výrazných špičkových hodnot.[3]

Důraz je kladen také na provozní podmínky střídače, kterými jsou požadavky na generování sinusových výstupních průběhů napětí a proudu, a dobré dynamické vlastnosti soustavy. Dynamickými vlastnostmi se myslí, že musí být zajištěno okamžité respektování změny zadání pro modulátor v konfiguraci generovaných výstupních spínacích impulzů.[3]

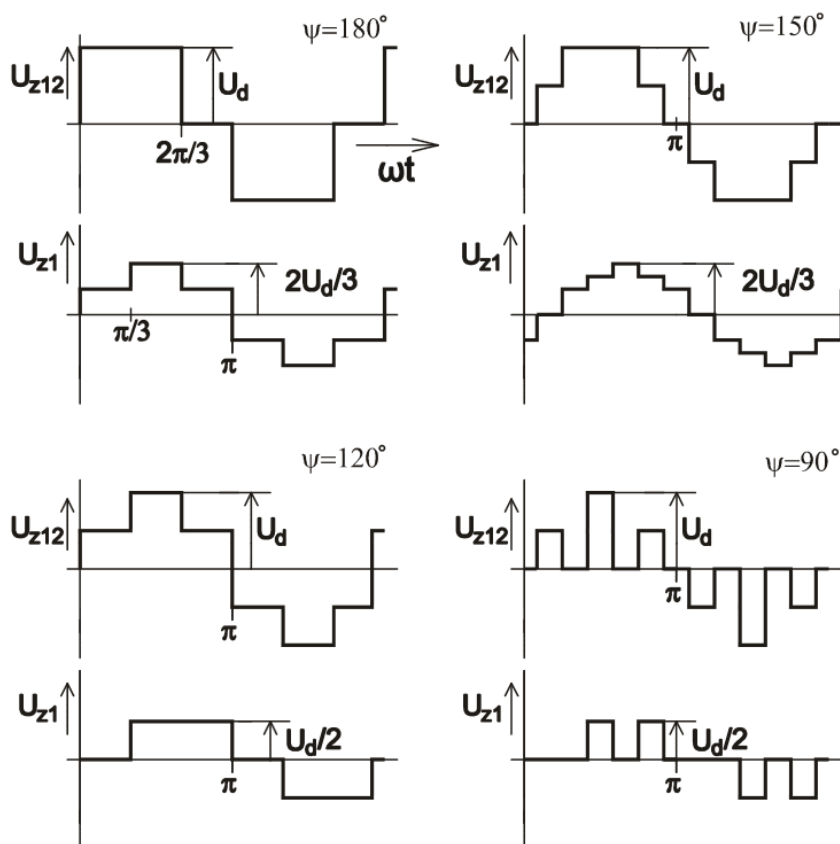
K posouzení modulace se vychází z poměru velikosti základní harmonické výstupního napětí střídače s hodnotou při obdélníkovém řízení. Tento poměr je při obdélníkovém řízení  $m = 1$  a je označován jako modulační poměr.[3]

$$m = \frac{A_{1m}}{A_{1O\ddot{R}}} \quad (1.4)$$

### 1.4.1 Obdélníkové řízení

Při obdélníkovém řízení je amplituda výstupního napětí závislá na vstupním stejnosměrném napětí. Nelze tedy měnit amplitudu základní harmonické výstupního napětí střídače. Z tohoto důvodu

je při použití obdélníkového řízení k napájení asynchronního motoru nezbytné při zvyšujících se otáčkách motor odbuzovat.[3]



Obrázek 1.5: Průběhy výstupního napětí pro různé programové úhly [2]

Na obrázku 1.5 lze pozorovat jednotlivé průběhy fázových a sdružených napětí pro jednotlivé programové úhly.

Obdélníkové řízení vytváří výstupní napětí s vysokým podílem základní harmonické. Amplitudu základní harmonické lze vypočítat ze vztahu[3]:

$$A_1 = \frac{2}{\pi} \cdot U_d \quad (1.5)$$

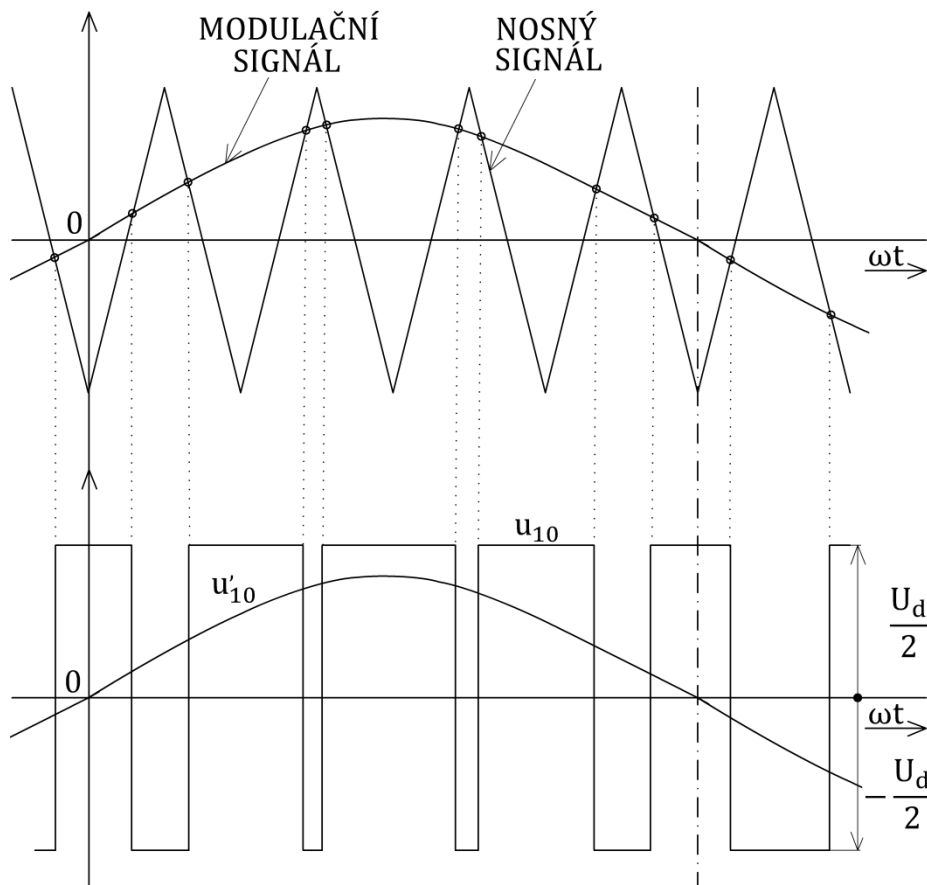
Průběh výstupního proudu je při tomto řízení nepříznivý a také obsahuje velké množství vyšších harmonických, čímž dochází k pulsaci mechanického momentu motoru. Z tohoto důvodu je tento způsob řízení vhodný pouze pro vysoké otáčky u speciálních pohonů velkých výkonů.[1,3]

#### 1.4.2 PWM

PWM, neboli pulsně šířková modulace, je v dnešní době nejpoužívanější typ řízení napětíových trojfázových střídačů. Lze jím měnit současně výstupní kmitočet a základní harmonickou výstupního napětí. Oproti obdélníkovému řízení obsahuje menší množství vyšších harmonických. Menší obsah vyšších harmonických zapříčiní to, že výstupní proud bude téměř sinusový.[1,3]



Princip PWM spočívá v porovnávání sinusového (modulačního signálu) a pilovitého signálu (nosného signálu), který může být synchronizovaný s modulačním signálem, anebo nesynchronizovaný. V okamžiku, kdy modulační signál je roven signálu nosnému, dochází k přepínání výstupního napětí střídače mezi hodnotami  $\frac{U_d}{2}$  a  $(-\frac{U_d}{2})$ . Spojnicí středních hodnot výstupního napětí střídače vznikne průběh napětí, který je obrazem modulačního signálu, jak lze vidět na obrázku 1.6. Zvyšováním kmitočtu nosného signálu dostaneme výstupní průběh napětí více podobný sinusovému.[1,3]



Obrázek 1.6: Porovnávání sinusového signálu s pilovitým k vytvoření pulzně šířkové modulace[1]

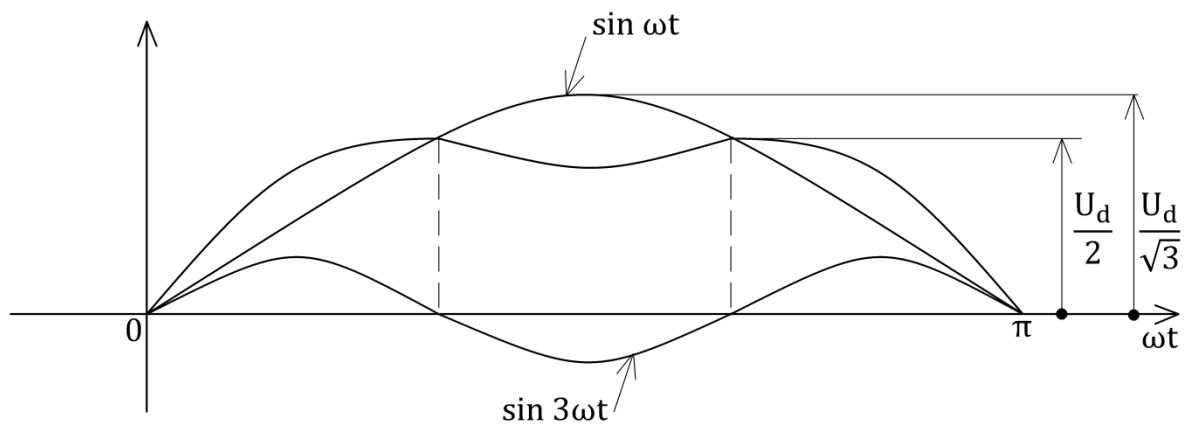
Z výše uvedeného vyplývá, že amplituda 1. harmonické výstupního fázového napětí může maximálně dosáhnout hodnoty  $\frac{U_d}{2}$ .

Pomocí maximální amplitudy 1. harmonické lze vypočítat modulační poměr pulzně šířkové modulace[3]:

$$m = \frac{\frac{U_d}{2}}{\frac{2}{\pi} U_d} = \frac{1}{4} = \frac{\pi}{4} = 0,785 \quad (1.6)$$

Výsledný modulační poměr je v porovnání s obdélníkovým řízením znatelně menší. Modulační poměr lze zvětšit pomocí vložení 3. harmonické, čímž se zvýší i amplituda 1. harmonické

výstupního napětí. Vložení 3. harmonické dojde k deformaci modulačního signálu a to zploštěním maxima, jak je možno vidět na obrázku 1.7.[1,3]



Obrázek 1.7: Deformace modulačního signálu 3. harmonickou[1,3]

Superponováním 3. harmonické bude výstupní amplituda napětí dosahovat  $\frac{U_d}{2}$ , ale se zvětšením 1. harmonické, která bude  $\frac{U_d}{\sqrt{3}}$ . Tím dojde i ke zvětšení modulačního poměru[1,3]:

$$m = \frac{\frac{U_d}{\sqrt{3}}}{\frac{2}{\pi} U_d} = \frac{1}{\frac{2\sqrt{3}}{\pi}} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} = 0,907 \quad (1.7)$$

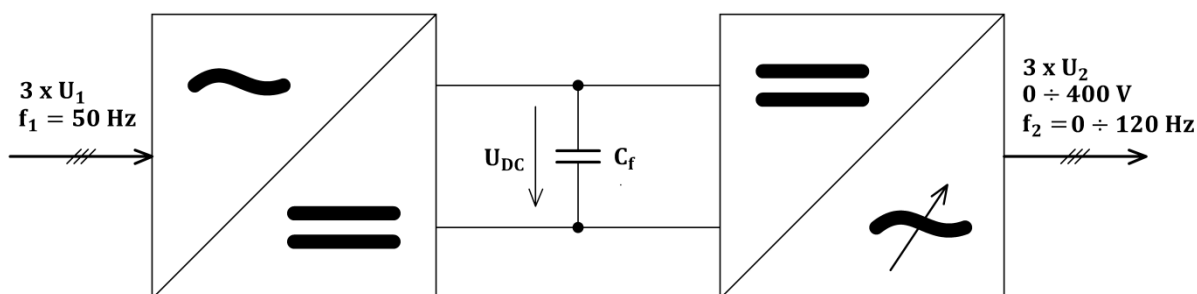
## 2 Měníče kmitočtu

Měníče kmitočtu slouží k přenosu napětí z jedné soustavy do druhé a to se změnou jeho frekvence a převážně i s doprovodnou regulací napětí. Tento přenos může být realizován buď přímo, nebo nepřímo.[2]

- Přímé měniče kmitočtu – umožňují měnit přímo vstupní střídavé napětí o určitém kmitočtu na výstupní střídavé napětí o jiném kmitočtu. Tyto měniče mohou být realizované pomocí vnější komutace (cyklokonvertory) nebo vlastní komutace s využitím vypínatelných součástek (maticové měniče). Cyklokonvertory využívají klasických tyristorů a výstupní kmitočet napětí dosahuje přibližně poloviny vstupního. Výhodou jsou nízké spínací ztráty a nevýhodou značně nesinusový odběr ze sítě. Maticové měniče jsou tvořeny nejčastěji součástkami IGBT. Použitím vypínatelných součástek lze docílit výstupního napětí s podstatně větším kmitočtem než u cyklokonvertorů.[1,2,3]
- Nepřímé měniče kmitočtu – umožňují změnu výstupního kmitočtu napětí nezávisle na vstupním kmitočtu. Skládají se z usměrňovače, stejnosměrného obvodu a střídače. Vstupní napětí o určitém kmitočtu se nejprve usměrní, poté je vyfiltrováno stejnosměrným obvodem a následně je střídačem rozstřídáno na požadovaný kmitočet s možností regulace efektivní hodnoty napětí. Nepřímé měniče můžeme rozdělit podle typu filtrace stejnosměrného obvodu na napět'ové a proudové. Nepřímé měniče kmitočtu mohou dosahovat výkonů až jednotek MW a výstupních kmitočtů až 10 kHz. Běžné výstupní kmitočty jsou ale od nuly až do stovek Hz.[1,2]

### 2.1 Nepřímé měniče kmitočtu napět'ového typu

Nepřímý měnič kmitočtu napět'ového typu je tvořen diodovým usměrňovačem, který usměrní vstupní střídavé napětí ze sítě, které je následně vyfiltrováno stejnosměrným meziobvodem tvořeným kondenzátorem o velké kapacitě (až jednotky tisíc  $\mu\text{F}$ ). Kondenzátor poté tvoří zdroj stejnosměrného napětí pro napět'ový střídač, který toto napětí rozstřídá na požadovaný kmitočet a velikost. Na obrázku 2.1 je zobrazeno blokové schéma nepřímého měniče napět'ového typu.[1,2]

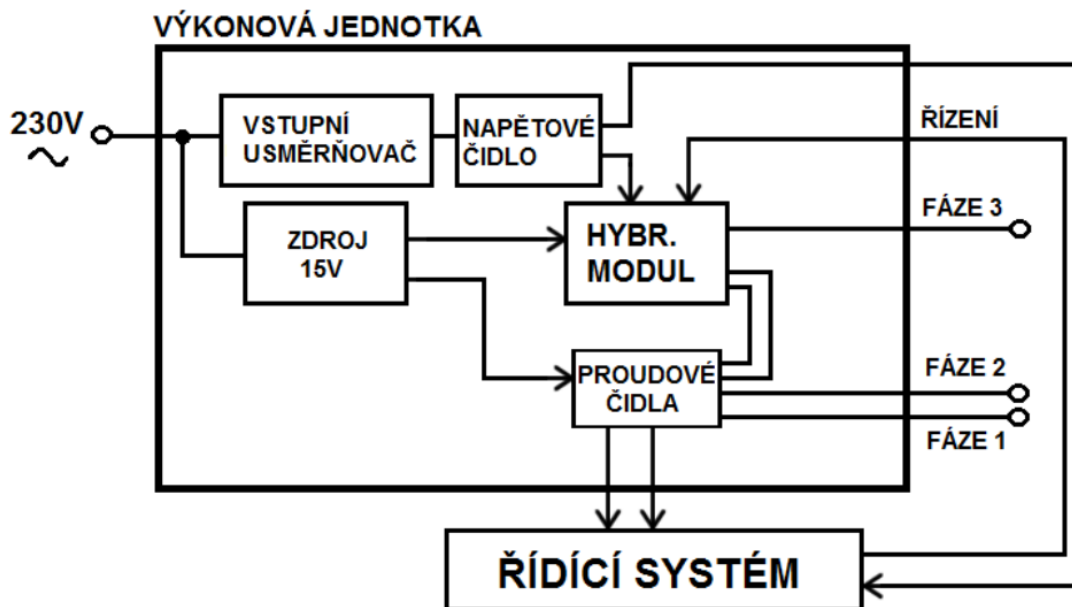


Obrázek 2.1: Blokové schéma nepřímého měniče kmitočtu napět'ového typu

## 2.2 Realizovaný nepřímý měnič kmitočtu s hybridním modulem

V této podkapitole bude popsána výkonová jednotka střídače, pro kterou bude aplikován řídicí systém. Výkonová jednotka střídače byla realizovaná v jiné bakalářské práci.[5]

Na obrázku 2.2 je zobrazeno blokové schéma výkonové jednotky.



Obrázek 2.2: Blokové schéma výkonové jednotky [5]

Realizovaný nepřímý měnič je napět'ového typu. Tvoří ho střídač, který je realizován pomocí hybridního modulu STHP20K60. K napájení hybridního modulu je použito transformované napětí ze sítě na 15 V, které je usměrněno můstkovým diodovým usměrňovačem. Dále měnič obsahuje diodový můstkový usměrňovač k napájení stejnosměrného meziobvodu. Meziobvod je tvořen čtyřmi elektrolytickými kondenzátory. Nepřímý měnič je také vybaven napět'ovým čidlem k měření napětí v meziobvodu a dvěma proudovými čidly, které měří proud ve dvou výstupních fázích.[5]

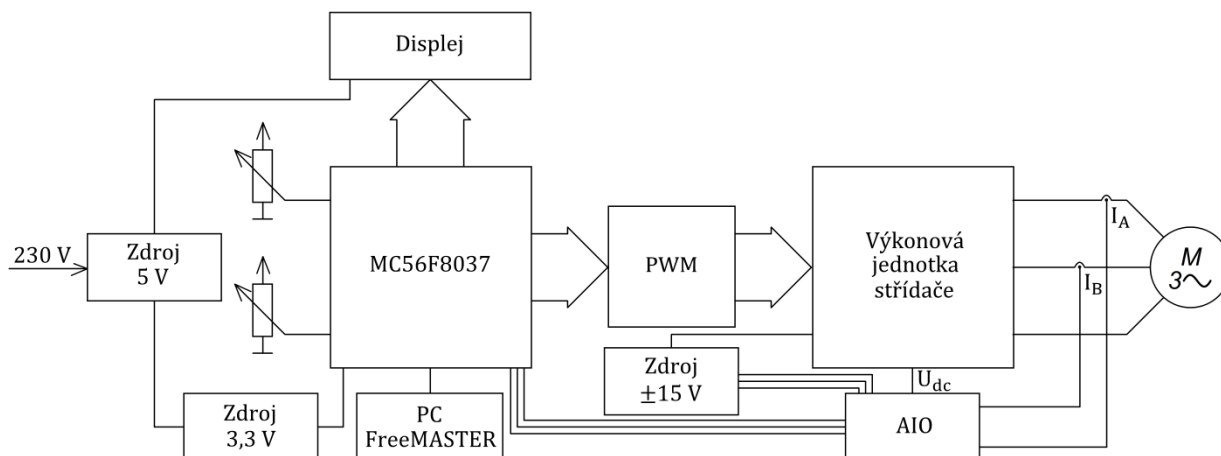
Hybridní modul STGIP20K60 obsahuje šest výkonových IGBT tranzistorů i s jejich budicími obvody. Hybridní modul umožňuje napětí v meziobvodu 400 V, maximální nepřerušovaný proud každého tranzistoru 18 A při teplotě 25 °C, generovat ochranné doby při spínání, vyhodnotit nadproud pomocí integrovaného komparátoru a automatické zablokování při poklesu svého napájecího napětí.[5]

Měření proudu je zajištěno pomocí proudových čidel LA-25NP. Jmenovitá hodnota měřeného proudu čidel je  $I_{PN} = 25$  A. Dovolená maximální hodnota měřeného proudu je 35 A. Měřicí rozsah se nastavuje podle zapojení primárních cívek. Čidlo neobsahuje měřicí rezistor, proto musí být umístěn na řídicím systému.[5]

Měření napětí v meziobvodu je realizováno pomocí napět'ového čidla LV 25-P. Měřicí rozsah čidla je od 10 V až do 500 V. Napět'ové čidlo také neobsahuje měřicí rezistor.[5]

### 3 Návrh a realizace řídicího systému

Při návrhu řídicího systému pro výkonovou jednotku střídače jsem vycházel z níže uvedeného blokového schématu na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Blokové schéma řídicího systému s připojením k výkonové jednotce střídače

Jádrem řídicího systému je 16bitový digitální signálový kontrolér MC56F8037. Dále řídicí systém obsahuje obvody pro úpravu signálu z výstupu čidel LEM, obvody pro řízení modulu střídače pomocí PWM, displej, potenciometry a napájecí zdroj. Řídicí systém také umožňuje komunikaci s PC. V dalších podkapitolách budou jednotlivé části řídicího systému popsány podrobněji.

#### 3.1 Vývojový kit MC56F8037EVM

Vývojový kit MC56F8037EVM od firmy Freescale obsahuje 16bitový digitální signálový kontrolér MC56F8037 s jádrem 56800E, rozhraní USB, konektor JTAG, resetovací tlačítko, dvě tlačítka pro přerušení, LED pro indikaci napájení, vstup/výstupní konektor a šest uživatelských debug LED.[4]

##### Základní vlastnosti jádra 56800E:

- duální Harvardská architektura
- frekvence jádra 32 MHz
- čtyři 36bitové akumulátory včetně doplňkových bitů
- 32bitová aritmetika
- paralelní instrukční sada
- tři interní adresové sběrnice
- čtyři interní datové sběrnice
- vysoce účinná instrukční sada pro C překladače a podpora lokálních proměnných
- velikost zásobníku přerušení je limitována pamětí

Paměť MC56F8037:

- duální Harvardská architektura, která povoluje až tři současné přístupy k programové a datové paměti
- ochranu proti neoprávněnému přístupu do interní paměti flash
- 64 kB programová paměť flash
- 8 kB sjednocená datová a programová paměť RAM

MC56F8037 obsahuje plnou sadu periferních obvodů - PWM, A/D převodníky, QSCI, I2C, PIT, časovače, D/A převodníky a analogové komparátory. Jednotlivé periférie mohou být nezávisle vypnuty k šetření energie. MC56F8037 nabízí až 53 GPIO pinů, jejíž nastavení závisí na periferních obvodech. Jednotlivé periferní obvody jsou vyvedeny na vstup/výstupní konektor vývojového kitu.[4]

Periferní obvody MC56F8037:

- šesti výstupový PWM modul
  - operační rychlost PWM až 96 MHz
  - 15 bitové rozlišení
  - PWM typu Center-aligned a Edge-aligned
- dva nezávislé 12bitové A/D převodníky
  - 2 x 8 kanálových vstupů
  - podporují současnou a sekvenční konverzi
  - vzorkovací frekvence až 2,67 MSPS
- dva 12bitové D/A převodníky
- dva 16bitové víceúčelové časovače
  - operační rychlost až 96 MHz
  - osm nezávislých čítačů/časovačů s možností řazení do kaskády
  - až dvanáct provozních režimů
- dvě sériové komunikační rozhraní (QSCI) v řadě s funkcemi LIN Slave
- dvě sériové periferní rozhraní (QSPI) v řadě
- tři 16bitové programovatelné intervalové časově (PIT)
- dva analogové komparátory (CPM)
- hodinový signál:
  - integrovaný oscilátor v čipu
  - krystalový oscilátor, krystalový rezonátor a externí hodinový signál
- JTAG/EOnCE programové rozhraní pro debuggování v reálném čase

### 3.2 Napájecí zdroj

Jako napájecí zdroj je použit spínaný zdroj MEAN WELL RS-15-5[6]. Jeho technické parametry jsou:

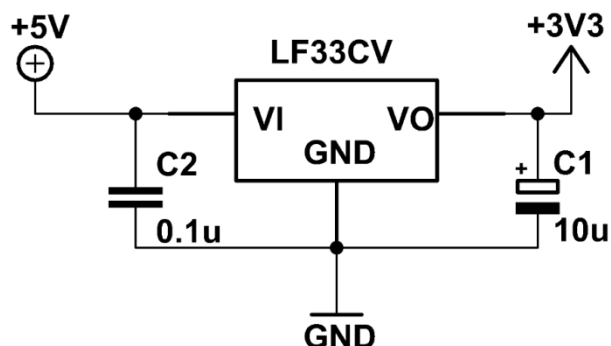
- rozsah vstupního AC napětí 85-264 V
- odběr při 240 V AC  $< 2$  mA
- výstupní napětí 5 V
- maximální výstupní proud 3 A
- skutečný výkon 15 W
- integrované ochrany proti přetížení, zkratu, přepětí a přehřátí.



Obrázek 3.2: Spínaný zdroj MEAN WELL RS-15-5 [6]

Propojení mezi řídicím systémem a spínaným zdrojem je zajištěno pomocí svorkovnic a kabelů.

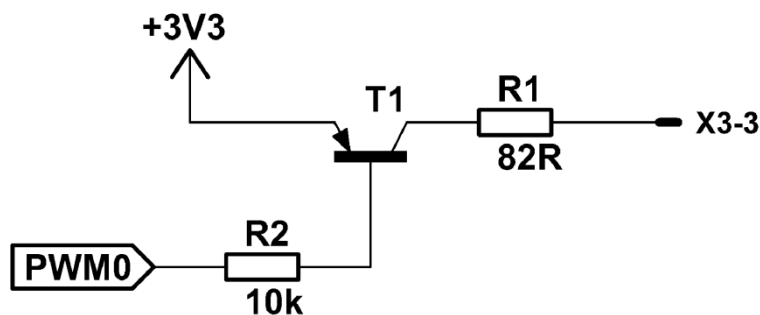
Protože digitální signálový kontrolér MC56F8037 vyžaduje napájení 3,3 V, je výstupní napětí spínaného zdroje potřeba regulovat. K tomu je použit regulátor napětí LF33CV. Tento regulátor je charakterizován velmi nízkým úbytkem napětí 0,4 V a výstupním proudem 0,5 A[7]. Regulátor není nutné opatřit chladičem z důvodu malého odběru proudu a tím i vzniklého ztrátového výkonu. Zapojení regulátoru napětí je zobrazeno na obrázku 3.3.



Obrázek 3.3: Zapojení regulátoru napětí LF33CV

### 3.3 Řízení hybridního modulu střídače

K řízení hybridního modulu střídače je na digitálním signálovém kontroléru šest výstupních pinů pro PWM, ale každý pin lze zatížit maximálně proudem 2 mA. Protože se hybridní modul řídí přes optočleny, které vyžadují 16 mA, je nutné kontrolér vybavit pomocnými obvody, aby nedošlo k jeho zničení. Pomocný obvod je realizován pomocí PNP tranzistorů BC807 v zapojení jako zesilovač proudu. Zapojení tranzistoru je na obrázku 3.4.



Obrázek 3.4: Zapojení tranzistoru pro PWM

Zvolený bázevý rezistor 10 k $\Omega$ , dostačuje k tomu, aby se tranzistor dostal do stavu saturace. Dále je nutné vypočíst rezistor  $R_1$ . K jeho vypočtení je nutné znát parametry tranzistoru BC807 a optočlenu HCPL 2531, které lze najít v datasheetu[9,10]. U tranzistoru stačí znát hodnotu saturačního napětí  $U_{CEsat} = 0,2$  V a u optočlenu hodnotu úbytku napětí v propustném směru  $U_F = 1,8$  V s proudem v propustném směru  $I_F = 16$  mA. Poté lze vypočíst hodnotu tranzistoru  $R_1$  pomocí vzorce:

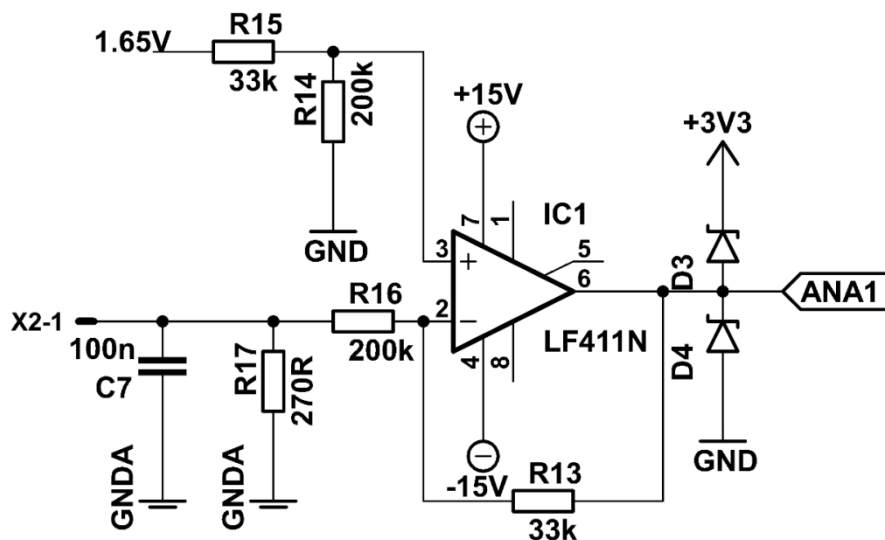
$$R_1 = \frac{V_{CC} - U_{CEsat} - U_F}{I_F} = \frac{3,3 - 0,2 - 1,8}{0,016} = 81,25 \, \Omega \quad (3.1)$$

Nyní se zvolí rezistor z řady, který je nejbližze hodnotě 81,25  $\Omega$ . Nejbližší rezistor v řadě E12 je 82  $\Omega$ .

### 3.4 Úprava signálu z výstupu čidel LEM

Jak již bylo uvedeno v podkapitole 2.2, napěťové čidlo a proudová čidla mají proudový výstup a není v nich zabudovaný měřicí rezistor. Proto musí být tento rezistor umístěn na řídicím systému. Velikost měřicího rezistoru 270  $\Omega$  byla zvolena pomocí datasheetu daných čidel[10]. Rozsah napětí na měřicím rezistoru potom vychází  $\pm 10$  V a je ho potřeba upravit na 0-3,3 V pro analogový vstup digitálního signálového kontroléru. Tato úprava je provedena pomocí rozdílového operačního zesilovače. Zapojení je zobrazeno na obrázku 3.5.





Obrázek 3.5: Zapojení rozdílového operačního zesilovače k úpravě výstupního signálu čidla LEM

Referenční napětí 1,65 V je použito proto, že výstupní napětí je potřeba posunout ze záporných hodnot do kladných. Pokud by tato reference nebyla použita, tak by byl výstupní rozsah napětí operačního zesilovače  $\pm 1,65$  V. Odečtením reference bude platit:

$$10 \text{ V} \rightarrow 0 \text{ V}$$

$$-10 \text{ V} \rightarrow 3,3 \text{ V}$$

Jednotlivé rezistory v zapojení se vypočtou pomocí superpozice a to za podmínky, že platí  $R_{13} = R_{15}$  a  $R_{14} = R_{16}$ . Pak stačí vypočíst příspěvek od každého vstupního zdroje. Nejdříve se nepočítá s úbytkem napětí na měřicím rezistoru. Tím bude platit vztah:

$$U'_{out} = \left(1 + \frac{R_{13}}{R_{16}}\right) \cdot \left(\frac{R_{14}}{R_{15} + R_{14}}\right) \cdot 1,65 \quad (3.2)$$

Poté se nepočítá s referenčním napětím a počítá se s úbytkem napětí na měřicím rezistoru. Pokud bude úbytek napětí na měřicím rezistoru  $U_m = 10$  V, tak bude platit:

$$U''_{out} = -\frac{R_{13}}{R_{16}} \cdot 10 \quad (3.3)$$

Tedy se oba dva příspěvky sečtou:

$$U_{out} = U'_{out} + U''_{out} = \left(1 + \frac{R_{13}}{R_{16}}\right) \cdot \left(\frac{R_{14}}{R_{15} + R_{14}}\right) \cdot 1,65 - \frac{R_{13}}{R_{16}} \cdot 10 \quad (3.4)$$

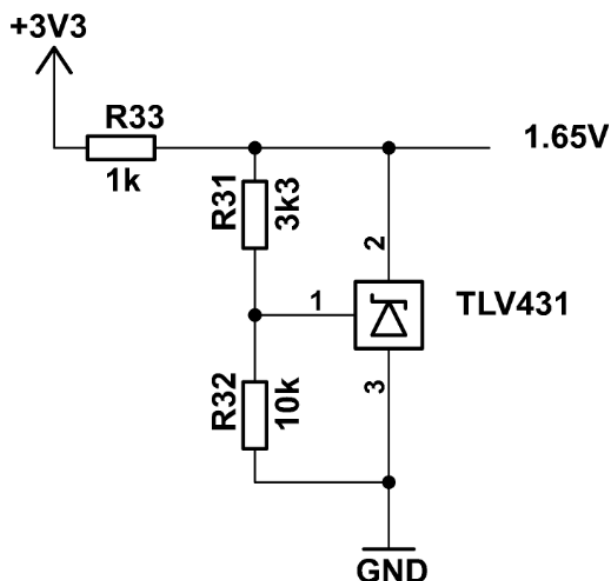
Jak je napsáno výše, pokud je úbytek napětí na měřicím rezistoru  $U_m = 10$  V, tak je na výstupu  $U_{out} = 0$  V. Současně, pokud platí  $R_{13} = R_{15} = R_1$  a  $R_{14} = R_{16} = R_2$ , tak následnou úpravou rovnice (3.4) vznikne vztah:

$$R_1 = 0,165 \cdot R_2 \quad (3.5)$$

Dále si stačí zvolit například hodnotu rezistoru  $R_2 = 200 \text{ k}\Omega$  a dopočíst  $R_1$ .

$$R_1 = 0,165 \cdot R_2 = 0,165 \cdot 200000 = 33000 \Omega \quad (3.6)$$

Referenční napětí 1,65 V jsem získal pomocí napět'ové reference TLV431. Zapojení této reference je zobrazeno na obrázku 3.6.



Obrázek 3.6: Zapojení napět'ové reference TLV431

K nastavení výstupního napětí na hodnotu  $U_{OUT} = 1,65 \text{ V}$  je potřeba znát referenční napětí napět'ové reference, které je  $U_{ref} = 1,24 \text{ V}$  a je uvedeno v datasheetu[11]. Poté se vychází ze vztahu:

$$U_{OUT} = U_{ref} \cdot \left(1 + \frac{R_{31}}{R_{32}}\right) \quad (3.7)$$

Vztah (3.7) se upraví pro výpočet rezistoru  $R_{31}$  a zvolí se hodnota rezistoru, například  $R_{32} = 10 \text{ k}\Omega$ .

$$R_{31} = \frac{(U_{OUT} - U_{ref}) \cdot R_{32}}{U_{ref}} = \frac{(1,65 - 1,24) \cdot 10000}{1,24} = 3306,45 \Omega \quad (3.8)$$

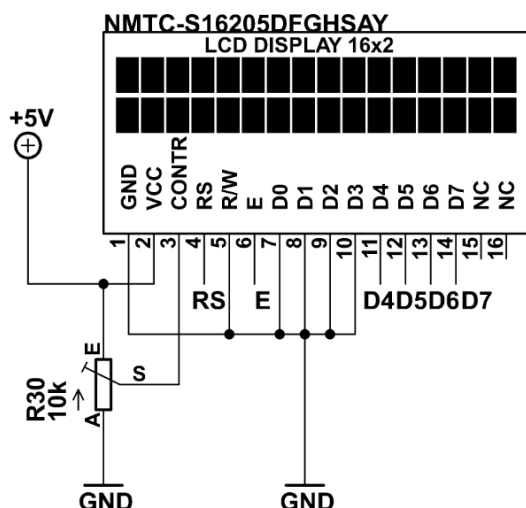
Následně stačí z řady E12 vybrat odpovídající rezistor  $R_{31} = 3300 \Omega$ .

### 3.5 LCD displej

Displej v řídicím systému slouží k zobrazení žádané hodnoty výstupního napětí a frekvence, napětí v meziobvodu a informace o zapnutém či vypnutém skalárním řízení. Zvolený displej NMTC-S16205DFGHSAY je šestnáctiznakový a dvouřádkový [8]. Zapojení displeje je zobrazeno na obrázku 3.7.

Základní vlastnosti displeje NMTC-S16205DFGHSAY:

- Napájení 5 V
- Řídicí logika 3,3 V
- Podsvícení LED (Napájení 4,2 V nebo 120-180 mA)
- Řízení čtyřbitové nebo osmibitové



Obrázek 3.7: Zapojení LCD displeje NMTC-S16205DFGHSAY

Displej je napájen ze spínaného zdroje MEAN WELL RS-15-5. Napájení podsvícení displeje závisí na propojení jumperů na displeji. V mém případě jsou zapojeny tak, že není nutné připojit napájení na piny podsvícení, protože je napájeno přímo z pinu VCC. Možnosti zapojení jumperů lze nalézt v datasheetu displeje[8]. Kontrast displeje se nastavuje pomocí 10kΩ trimru, který je připojen na pin CONTR. Dále bylo zvoleno čtyřbitové řízení displeje z důvodu úspory místa na desce plošných spojů, protože nevyužité čtyři bity se připojí na zem, jak lze vidět na obrázku 3.7.

V tabulce 3.1 je popis jednotlivých pinů displeje.

Tabulka 3.1: Popis pinů displeje [8]

Číslo pinu	Název pinu	Popis
1	GND	Zem
2	VCC	Napájení logiky displeje
3	CONTR	Nastavení kontrastu
4	RS	Register select (data = 1, příkazy 0)
5	R/W	Read/write (čtení = 1, zápis = 0)
6	E	Enable
7 - 14	D0-D7	Datová sběrnice (4bitová nebo 8bitová)
15 - 16	BKL	Napájení podsvícení. Závisí na propojení jumperů na displeji.

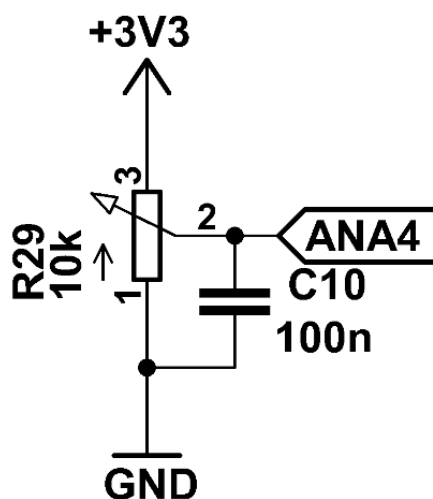
Na obrázku 3.8 je ukázka displeje s měřením napětí v meziobvodu, s nastaveným výstupním napětím a nastavenou výstupní frekvencí při zapnutém skalárním řízení.



Obrázek 3.8: Ukázka zobrazení hodnot na displeji

### 3.6 Potenciometry

K nastavení frekvence a napětí na výstupu střídače jsou použity potenciometry. Potenciometry jsou použity místo tlačítek k ulehčení práce při psaní programu. Na obrázku 3.9 je zobrazeno zapojení. Potenciometr je připojen na analogový vstup digitálního signálového kontroléru MC56F8037.



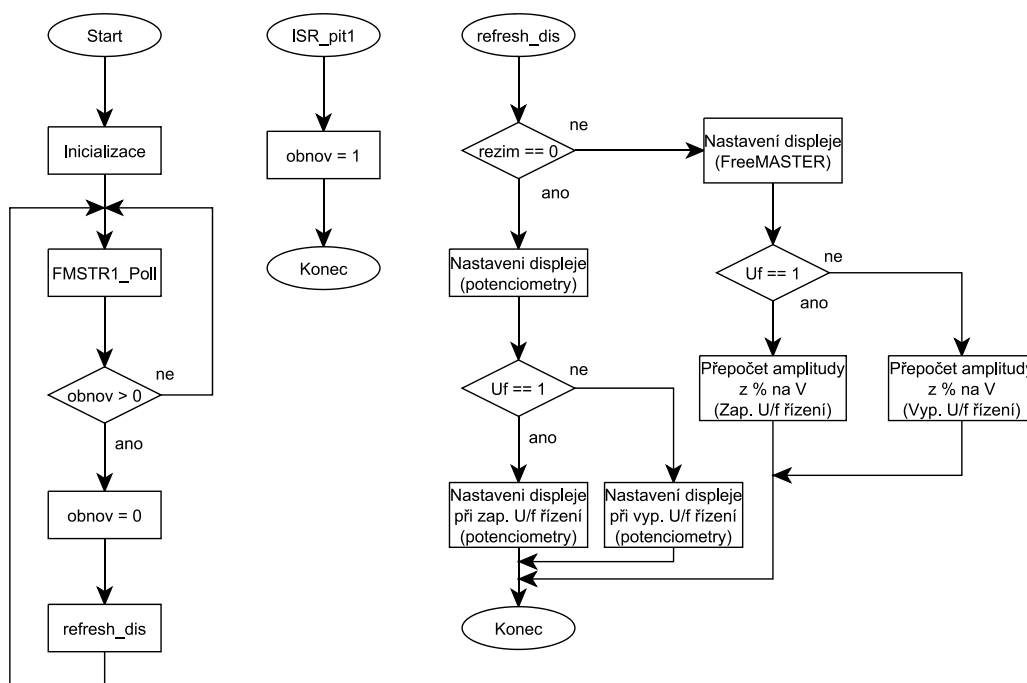
Obrázek 3.9: Zapojení potenciometrů

## 4 Programové vybavení řídicího systému

V této kapitole bude popsáno programové vybavení řídicího systému. Program řídicího systému je napsán ve vývojovém prostředí CodeWarrior od firmy Freescale. Při psaní je využíváno komponentů z Processor Expert.

Program bude popsán pomocí vývojového diagramu, který je rozdělený na dvě části. Na část nekonečné smyčky a přerušení pro obnovu displeje a na část přerušení pro nastavení A/D převodníku a výpočtu PWM.

Vývojový diagram, na kterém je zobrazena nekonečná smyčka a přerušení pro obnovu displeje, je na obrázku 4.1.

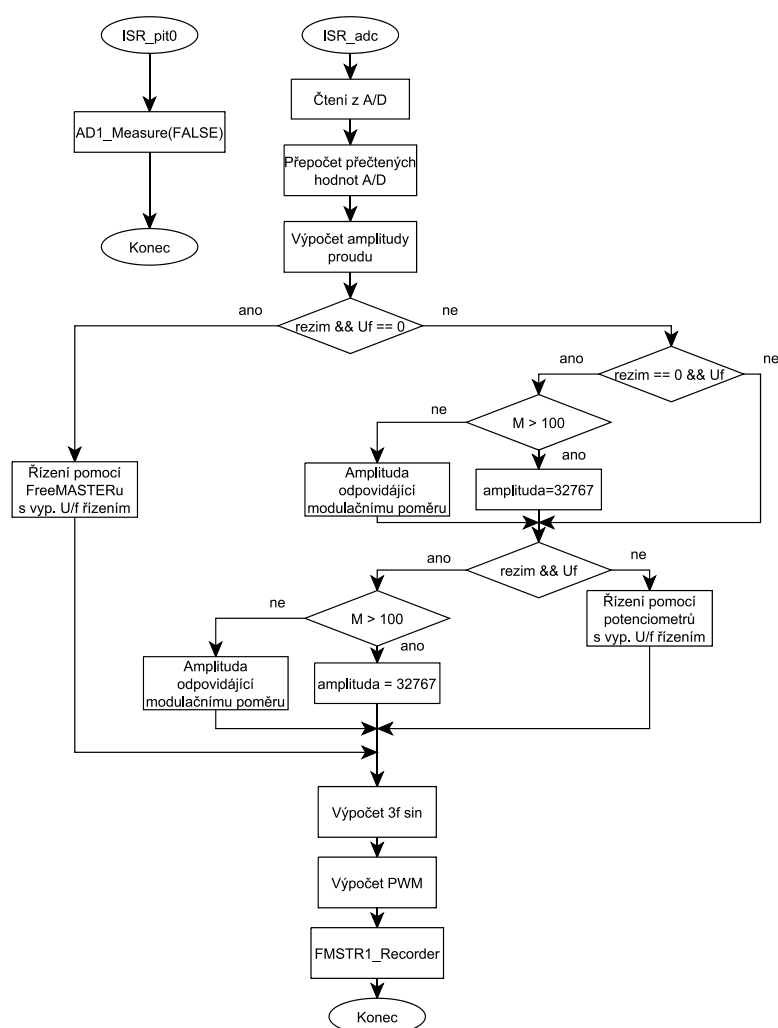


Obrázek 4.1: První část vývojového diagramu s nekonečnou smyčkou a přerušením pro obnovu displeje

Program začíná inicializací, při které jsou deklarovány jednotlivé proměnné a pole. Dále v inicializaci dochází k zapnutí časovače pomocí komponenty *TimerInt* a funkce *TII\_Enable*. V nekonečné smyčce je funkce *FMSTR1\_Poll*, která umožňuje komunikaci s PC přes program Freemaster. Dále nekonečná smyčka obsahuje podmínku, při jejímž splnění dochází k obnově displeje. Podmínka je splněna každých 50 ms, protože nastane přerušení *ISR\_pit1*, v kterém se nahraje do proměnné *obnov* číslo 1. K zápisu znaků na displej se používá komponenta *LCDHTA*. Při obnově displeje je nejdříve zjišťováno pomocí podmínky, zda bude řídicí systém řízen pomocí programu Freemaster, nebo pomocí potenciometrů. Pokud je podmínka splněna, tedy proměnná *rezim* = 0, tak dochází k základnímu nastavení displeje, které odpovídá řízení potenciometrů. Zobrazení hodnot na displeji je možné vidět na obrázku 3.8. Následně se pomocí další podmínky rozhoduje, jestli je

zapnuté skalární řízení. Pokud je proměnná  $U_f = 1$ , tak je podmínka splněna, na displeji se nastaví informace o zapnutém skalárním řízení a amplituda se přepočte na volty. Pokud  $U_f = 0$ , tak je skalární řízení vypnuté, na displeji se zobrazí informace o vypnutém skalárním řízení a amplituda je udávána v procentech. Řídí-li se řídicí systém pomocí Freemasteru, tak na začátku obnovy displeje není podmínka splněna a na displej se nastaví informace o řízení programem Freemaster. Následně se také pomocí podmínky, která zjišťuje, zda se řídí pomocí skalárního řízení, nastaví, jak bude amplituda napětí přepočtena z procent na volty. Poté nastává konec obnovy displeje i s vynulováním proměnné *obnov*. Nakonec dochází k opakování nekonečné smyčky.

Po zapnutí časovače v inicializaci také dochází každých 100  $\mu\text{s}$  k přerušením, během kterých se nastavuje čtení z A/D převodníku a následně se vypočítává PWM pro řízení hybridního modulu. Vývojový diagram pro tato přerušení je na obrázku 4.2.



Obrázek 4.2: Druhá část vývojového diagramu s přerušením pro nastavení A/D převodníku a vytváření PWM

Přerušení pro výpočet PWM začíná přečtením hodnot z kanálů A/D převodníku. Hodnoty jsou uloženy do pole jako 16bitová čísla, která se dále upravují. A/D převodník převádí změřené napětí z meziobvodu, proudy ze dvou fází a výstup potenciometrů pro nastavení amplitudy napětí a frekvence. Pro napětí v meziobvodu a proudy ve dvou fázích je toto 16bitové číslo posunuté o čtyři bity doprava a následně je přepočtené pomocí lineárních rovnic na odpovídající fyzikální veličiny. Pomocí komponenty *MC\_ClarkePark* je provedena transformace T3/2 a vypočtena amplituda ze dvou naměřených fázových proudů. Přečtené hodnoty z kanálů A/D převodníku od potenciometrů jsou dále upravovány v jednotlivých způsobech řízení.

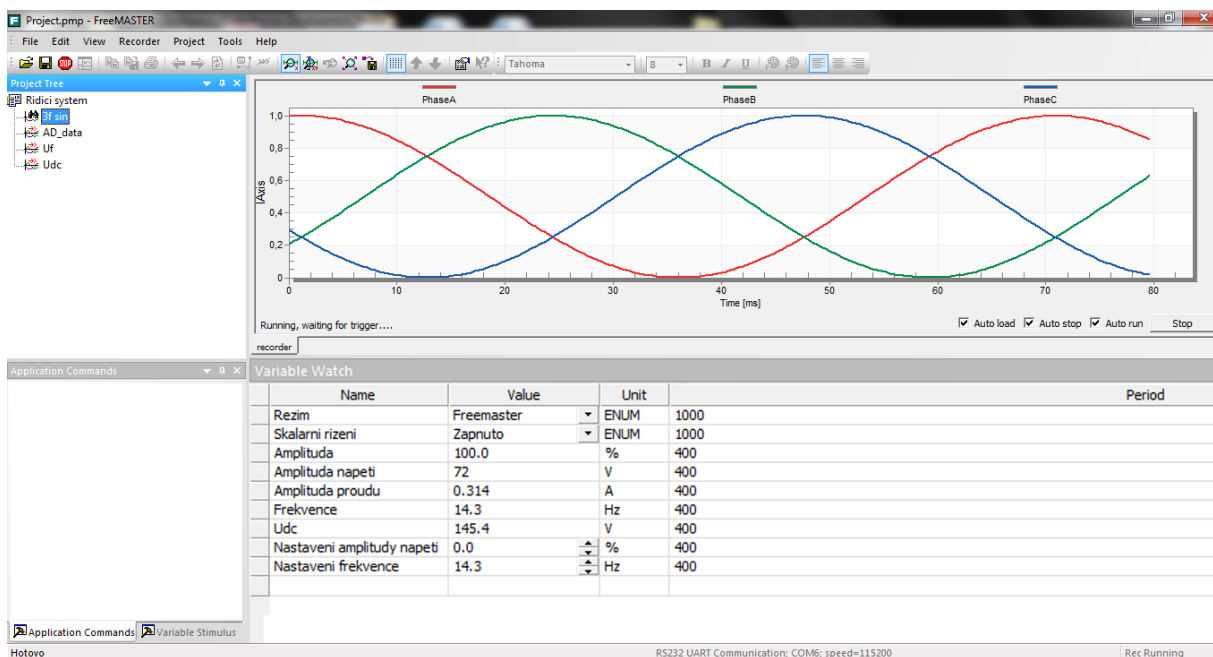
Při každém způsobu řízení platí, že maximální amplituda napětí je rovna číslu 32767 a maximální frekvence je rovna číslu 655. Odpovídající rozsah pro nastavení amplitudy se získá posunutím přečteného čísla z A/D převodníku o 1 bit doprava a u frekvence vydělením číslem 100. Jednotlivé způsoby řízení jsou určeny splněním daných podmínek.

Nejdříve se vyhodnocuje podmínka, podle které se určuje, zda se bude řídicí systém řídit pomocí programu Freemaster s vypnutým skalárním řízením. Pokud je podmínka splněna, tedy je nastavena proměnná *rezim = 1* a *Uf = 0*, tak se z nastavených hodnot ve Freemasteru provede přepoččet na odpovídající rozsah pro nastavení výstupní frekvence a amplitudy napětí. Pokud tato podmínka není splněna, dochází k nastavení skalárního řízení řízeného potenciometry. Za předpokladu, že *rezim = 0* a *Uf = 1*, se vypočítává modulační poměr z převedeného čísla A/D převodníkem od výstupu potenciometru, který slouží pro nastavení frekvence. Pokud je modulační poměr větší než 100, což odpovídá hodnotě 1, tak se zapíše do proměnné *amplituda* číslo 32767 a to odpovídá maximální amplitudě napětí na výstupu střídače. Jestliže je modulační poměr menší než 100, tak se amplituda napětí vypočte pro daný modulační poměr procentuálně z 32767. Pokud podmínka pro skalární řízení potenciometry není splněna, tak tělo podmínky se přeskakuje a nastává další podmínka, která určuje, zda se bude řídit skalárním řízením pomocí programu Freemaster. Tělo této podmínky je stejné jako tělo podmínky při skalárním řízení potenciometry, pouze hodnoty pro výpočet modulačního poměru se počítají přes Freemaster. Není-li ani jedna z výše uvedených podmínek splněna, tak je skalární řízení vypnuto a výstupní napětí a frekvence se nastavuje pomocí potenciometrů.

Následně, z vypočtených hodnot uložených do proměnných *amplituda* a *frekvence*, se nastavuje výpočet tří sinusových průběhů, které jsou navzájem posunuty o 120°. K výpočtu sinusových průběhů nebyla použita funkce *Gen3PhWaveSineIntp* z komponenty *MC\_WaveGenerate*, protože došlo ke komplikacím. Proto jsem použil jinou knihovnu a program pro výpočet, které mi poskytl vedoucí práce. Při výpočtu se nejprve počítá sinus úhlu pro každou fázi, poté je k úhlu připočtena frekvence. Následně se proměnná *amplituda* vynásobí hodnotou 0,5 pomocí datového typu *FRAC16*, pak se přepočtená amplituda vynásobí daným sinusem úhlu a přičte se k ní hodnota 0,5 pomocí datového typu *FRAC16*. Pomocí datového typu *FRAC16* se přepočítává rozsah vypočítaného sinusového průběhu, který je -1 až 1, protože následující funkce vyžaduje rozsah sinu od 0 do 1. Tento výpočet probíhá pro každou fázi zvlášť. Z těchto průběhů se následně pomocí komponenty *PWMMC* a funkce *PWMC1\_SetRatio15* vypočítává pulsně šířková modulace pro řízení hybridního modulu. Dále je použita funkce *FMSTR1\_Recorder*, která umožňuje grafické zobrazení vypočtených sinusových průběhů v programu Freemaster.

## 4.1 Komunikace s PC

Jak bylo uvedeno dříve, řídicí systém umožňuje komunikaci s PC přes program Freemaster. Ke komunikaci s PC se využívá rozhraní USB. Na obrázku 4.3 je zobrazeno prostředí programu Freemaster. V okně Variable Watch lze nastavit výstupní frekvenci a amplitudu napětí, řízení pomocí potenciometrů nebo programu Freemaster, sledovat amplitudu proudu, napětí v meziobvodu, a také zapínat skalární řízení.



Obrázek 4.3: Prostředí programu FreeMASTER



## 5 Ověření funkce řídicího systému

Připojením řídicího systému ke střídači bylo provedeno závěrečné měření. Jako zátěž byl použit trojfázový asynchronní motor, jehož štičkové parametry jsou uvedeny v tabulce 5.1. Měření bylo provedeno pomocí třífázového analyzátoru harmonických FLUKE Norma 4000 a osciloskopu LeCroy WaveRunner 604Zi. Naměřené hodnoty a průběhy jsou měřeny při spínacím kmitočtu 2 kHz.

Tabulka 5.1: Štičkové parametry motoru

Jmenovité napětí	380	[V] (Y)
Jmenovitý výkon	180	[W]
Otáčky	900	[min <sup>-1</sup> ]
Účinník	0,70	[-]
Frekvence	50	[Hz]
Stupeň krytí	IP44	

Pomocí třífázového analyzátoru harmonických byla změřena výstupní hodnota napětí první harmonické a efektivní hodnota napětí a proudu střídače. Naměřené hodnoty jsou umístěny v tabulkách 5.2 až 5.5, dále jsou tyto hodnoty vyneseny v grafech na obrázcích 5.1 až 5.3.

Tabulka 5.2: Naměřené hodnoty při napětí v meziobvodu  $U_{dc} = 100$  V

$U_z$ [V]	$f$ [Hz]	$U_{H01}$ [V]	$U_{rms}$ [V]	$I_{rms}$ [A]
16	0	0	21,44	0,27
47,4	5	32,26	40	0,5
50	10	34,8	41,9	0,443
51	15	35,76	42,8	0,38
50	20	35,4	42,4	0,33
50	25	35,2	42,19	0,31
49	30	34,62	41,48	0,3
49	35	34,7	41,62	0,28
49	40	34,81	41,6	0,28
50	50	34,7	41,7	0,28
51	60	34,8	41,7	0,28
50	70	34,6	41,6	0,27
50	80	34,5	41,57	0,28
50	90	34,3	41,39	0,27
50	100	34,1	41,1	0,27

Tabulka 5.3: *Naměřené hodnoty při napětí v meziobvodu  $U_{dc} = 200$  V*

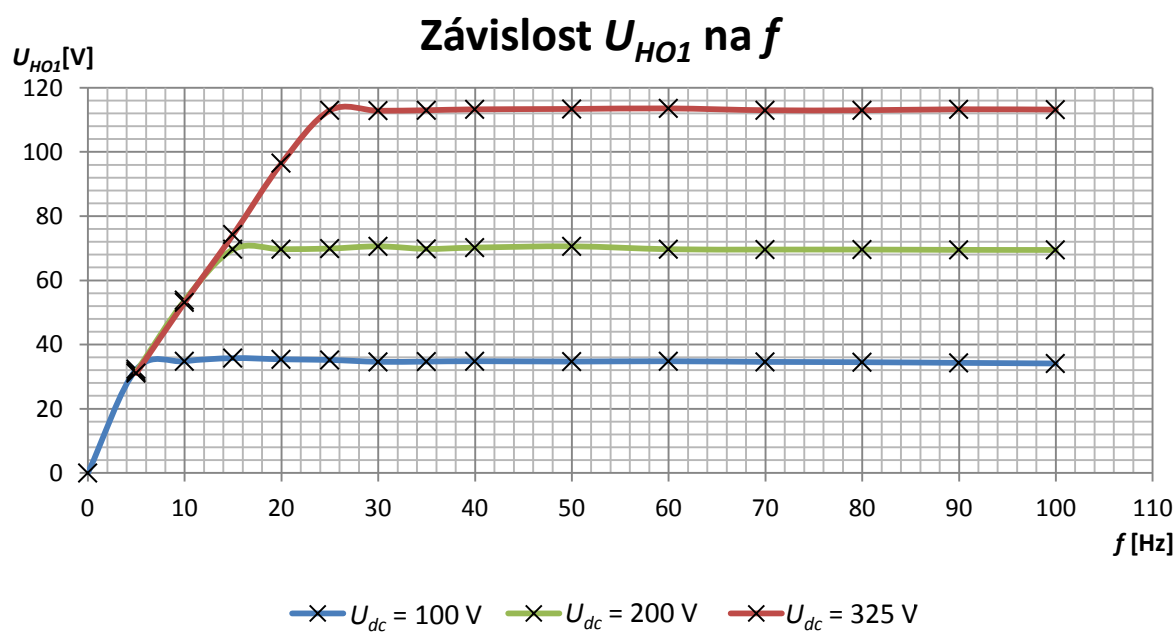
$U_z$ [V]	$f$ [Hz]	$U_{H01}$ [V]	$U_{rms}$ [V]	$I_{rms}$ [A]
47	5	31,6	55,15	0,5
77	10	53,8	73	0,66
100	15	69,64	83,57	0,65
100	20	69,7	83,5	0,53
100	25	69,9	83,72	0,45
100	30	70,6	84,39	0,4
100	35	69,8	83,51	0,37
100	40	70,2	84	0,34
100	50	70,6	84,4	0,32
100	60	69,7	83,3	0,29
100	70	69,6	83,33	0,27
100	80	69,6	83,4	0,27
100	90	69,5	83,3	0,26
100	100	69,47	83,4	0,26

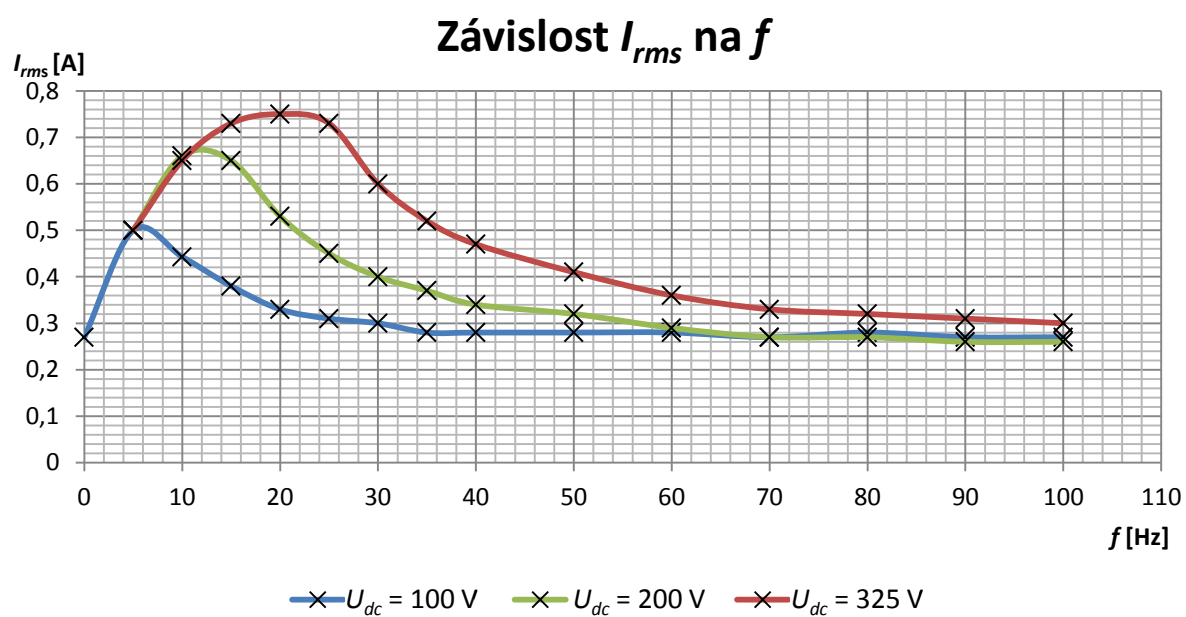
Tabulka 5.4: *Naměřené hodnoty při napětí v meziobvodu  $U_{dc} = 325$  V*

$U_z$ [V]	$f$ [Hz]	$U_{H01}$ [V]	$U_{rms}$ [V]	$I_{rms}$ [A]
47	5	31,1	67,8	0,5
78	10	53,17	90,9	0,65
107	15	74,23	108,3	0,73
139	20	96,46	124,3	0,75
162	25	112,95	135,45	0,73
162	30	112,84	134,8	0,6
162	35	113	135	0,52
162	40	113,28	135,5	0,47
162	50	113,4	135,6	0,41
162	60	113,57	135,8	0,36
162	70	113	135	0,33
162	80	113	135,3	0,32
162	90	113,3	135,5	0,31
162	100	113,2	135,5	0,3

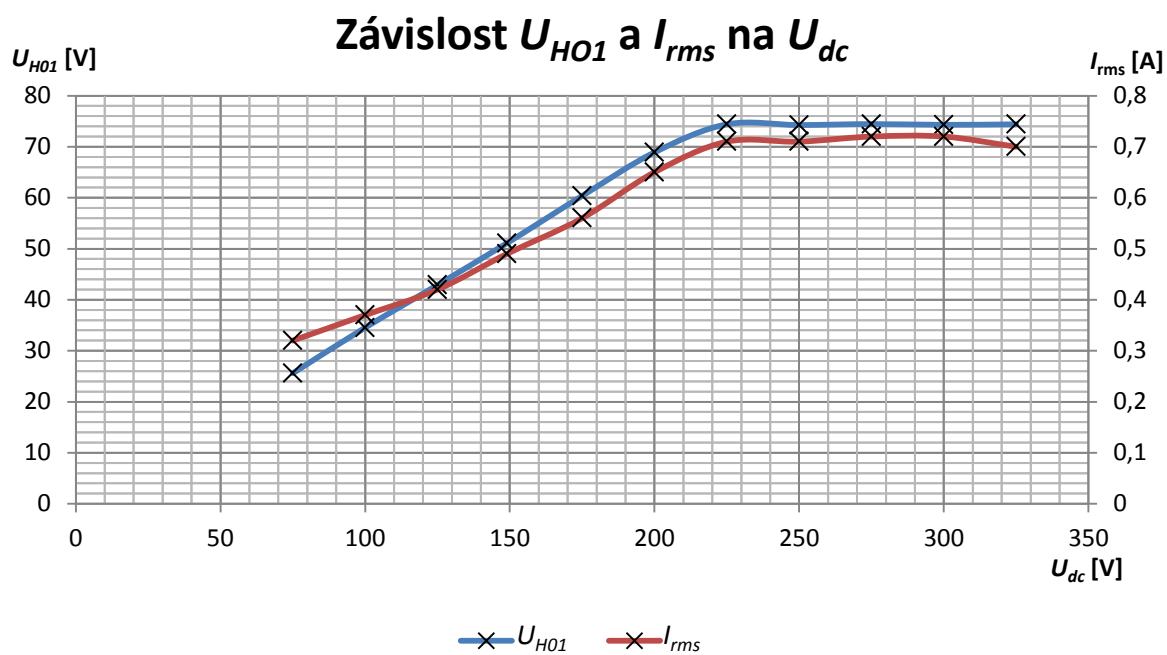
Tabulka 5.5: Naměřené hodnoty při ověřování skalárního řízení se změnou napětí v meziobvodu

$U_{dc}$ [V]	$U_{HO1}$ [V]	$U_{rms}$ [V]	$I_{rms}$ [A]
325	74,4	108	0,7
300	74,3	104,4	0,72
275	74,45	100	0,72
250	74,26	95,6	0,71
225	74,4	91,1	0,71
200	68,9	82,7	0,65
175	60,37	72,1	0,56
149	51,1	61,4	0,49
125	42,9	51,52	0,42
100	34,53	41,4	0,37
75	25,6	30,9	0,32

Obrázek 5.1: Závislost  $U_{HO1}$  na  $f$



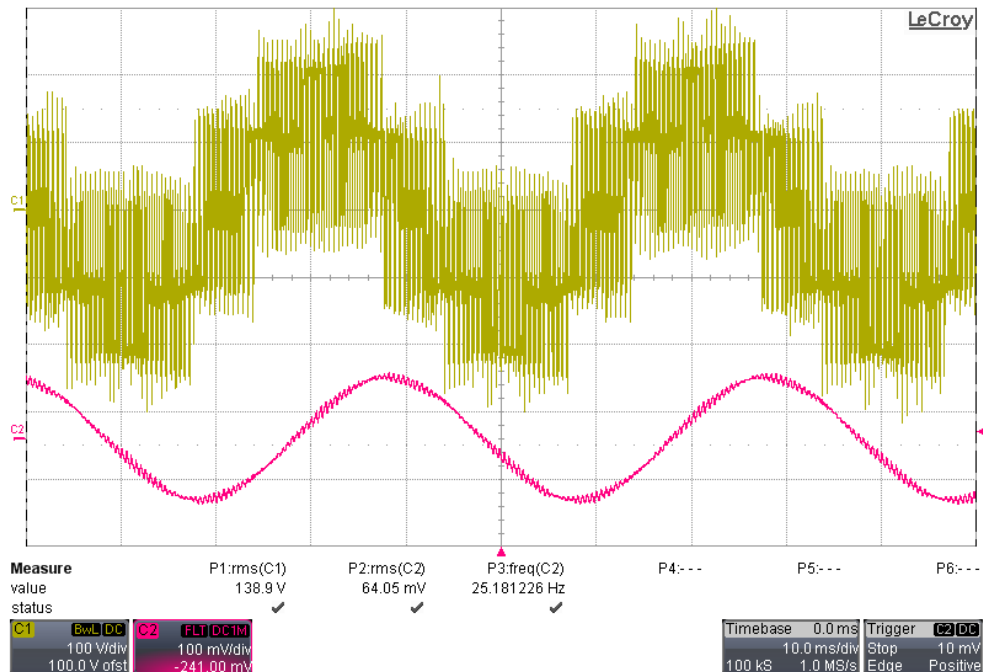
Obrázek 5.2: Závislost  $I_{rms}$  na  $f$



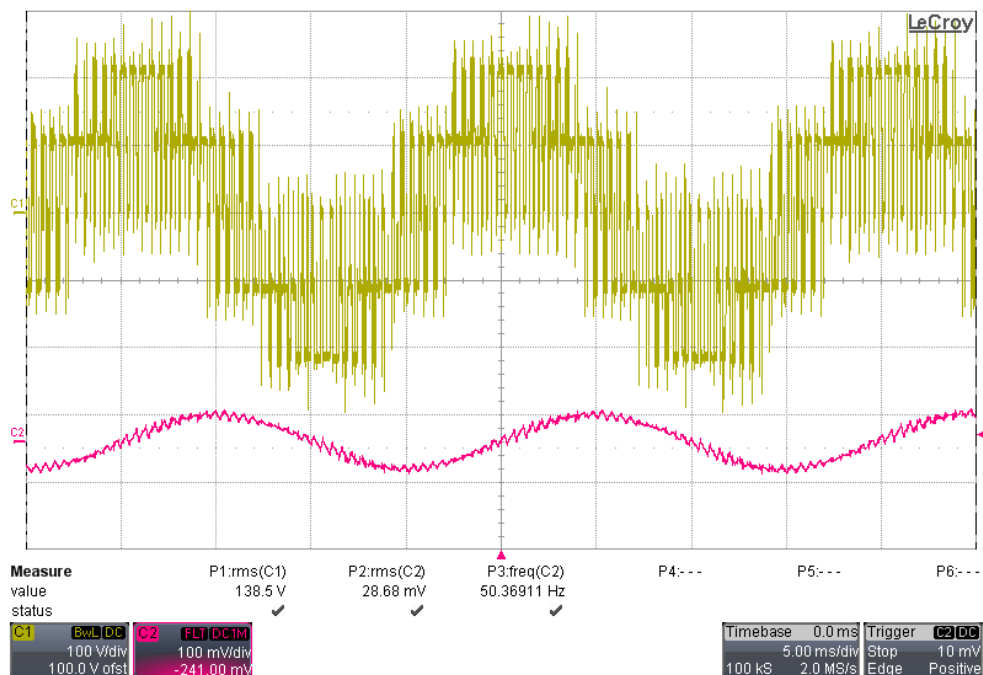
Obrázek 5.3: Závislost  $U_{HO1}$  a  $I_{rms}$  na  $U_{dc}$

Pomocí osciloskopu LeCroy WaveRunner 604Zi byl změřen výstupní průběh fázového napětí a proudu střídače pro různé výstupní frekvence. Průběhy jsou zobrazeny na obrázcích 5.4 až 5.6.

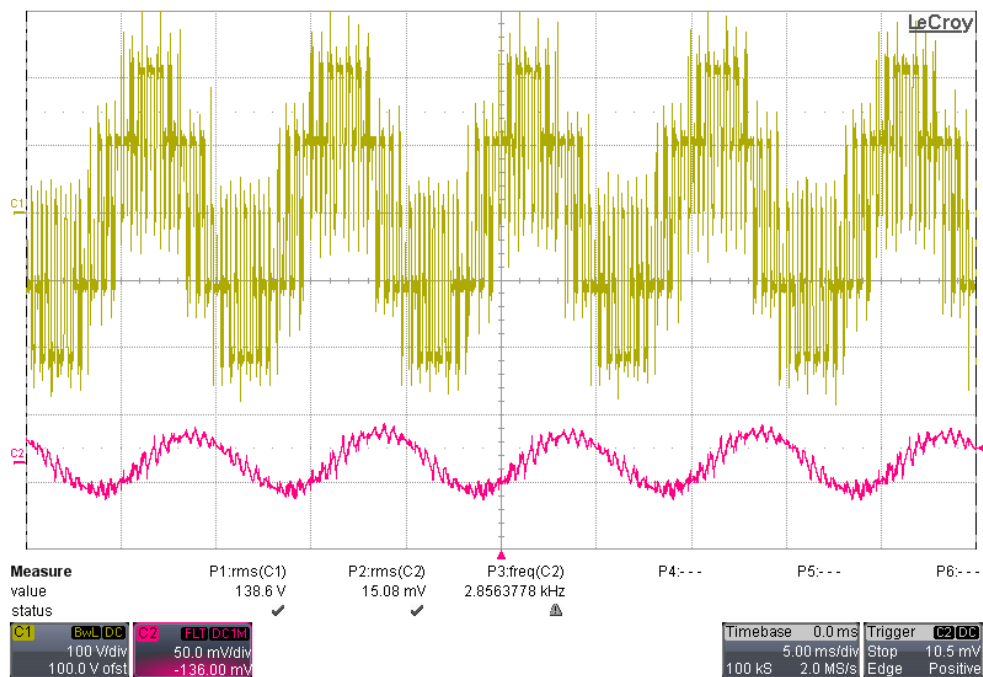
U níže uvedených průběhů je na kanálu C1 (žlutý) zobrazeno výstupní fázové napětí střídače a na kanálu C2 (růžový) výstupní fázový proud.



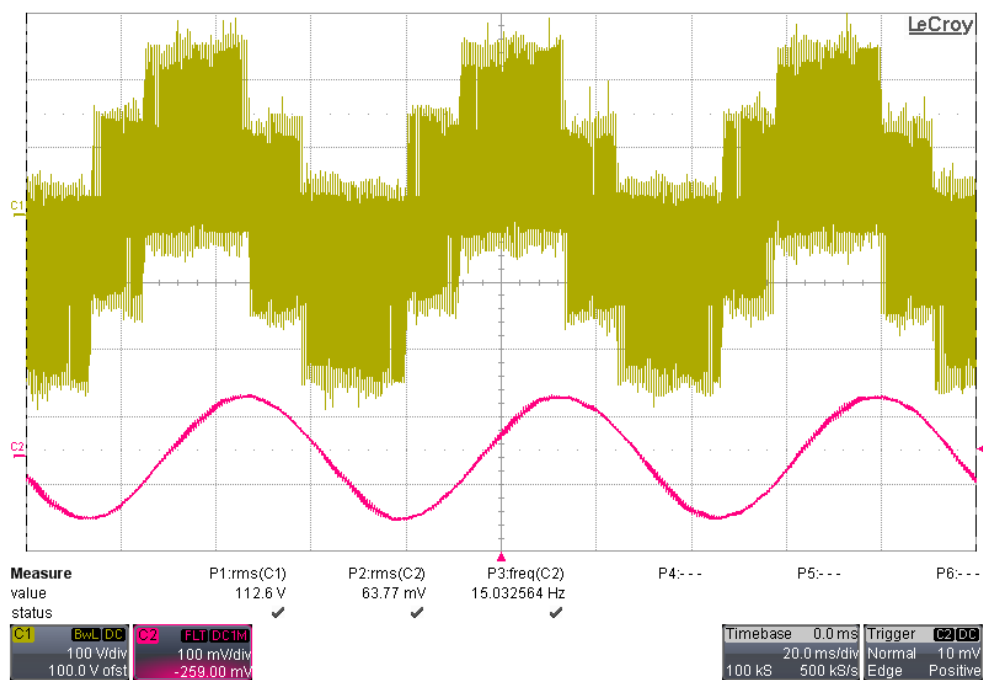
Obrázek 5.4: Průběh výstupního fázového napětí a proudu při  $f = 25$  Hz

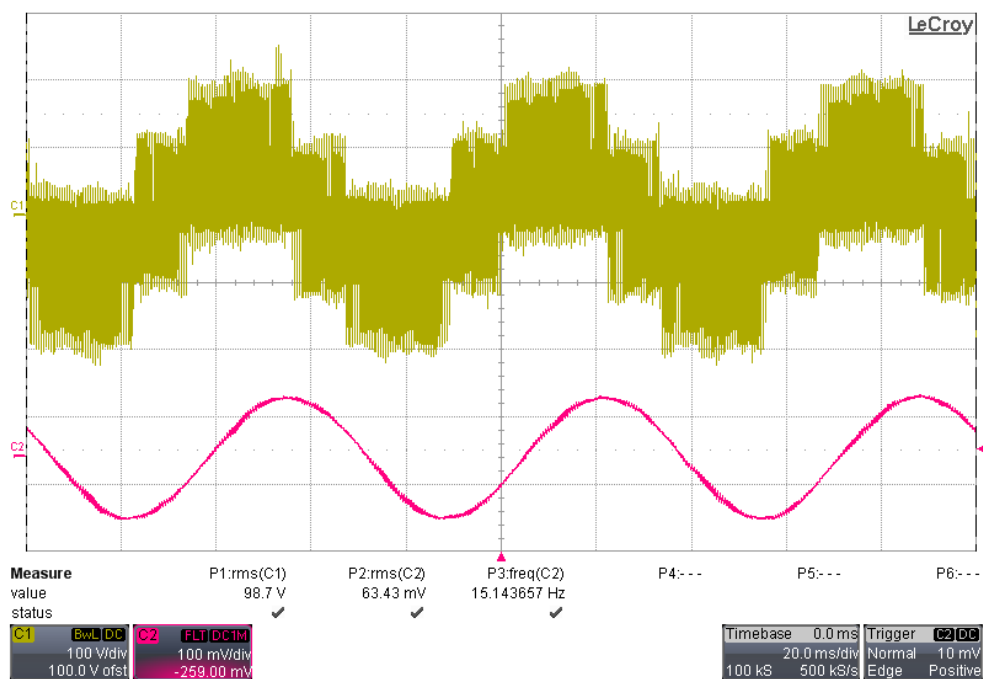


Obrázek 5.5: Průběh výstupního fázového napětí a proudu při  $f = 50$  Hz

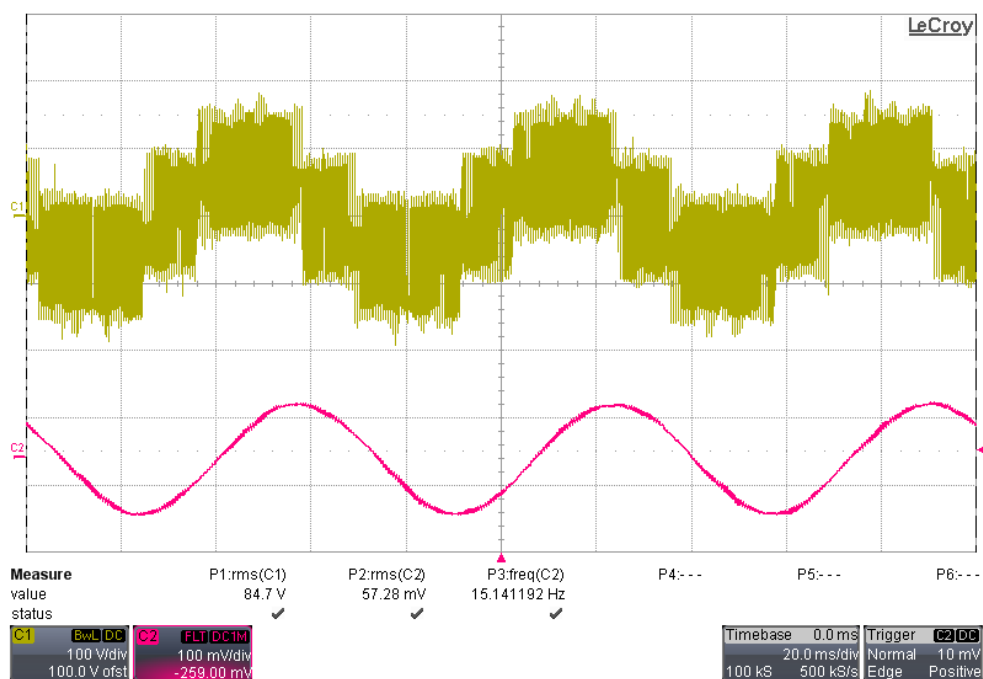
Obrázek 5.6: Průběh výstupního fázového napětí a proudu při  $f = 100$  Hz

Dále pomocí osciloskopu bylo ověřeno skalární řízení se změnou napětí v meziobvodu. Průběhy výstupních napětí a proudů pro různé napětí v meziobvodu jsou zobrazeny na obrázcích 5.7 až 5.8. Z měřených průběhů lze pozorovat, že se zmenšením napětí v meziobvodu z 325 V na 250 V nedojde k poklesu napětí první harmonické napětí a tím je efektivní hodnota výstupního proudu stále 630 mA. Na posledním obrázku 5.8 už dochází k poklesu napětí v meziobvodu natolik, že střídač nedokáže dodávat požadované napětí na výstup a dochází k odbuzování, tedy k poklesu proudu.

Obrázek 5.7: Průběh výstupního fázového napětí a proudu s napětím v meziobvodu  $U_{dc} = 325$  V



Obrázek 5.8: Průběh výstupního fázového napětí a proudu s napětím v meziobvodu  $U_{dc} = 250$  V



Obrázek 5.9: Průběh výstupního fázového napětí a proudu s napětím v meziobvodu  $U_{dc} = 200$  V

## Závěr

Cílem mé bakalářské práce bylo navrhnout řídicí systém pro výkonovou jednotku střídače. Návrhu řídicího systému jsem se věnoval ve druhé části práce, kde jsem popsal funkci a návrh jednotlivých obvodů a také programové vybavení. Podařilo se mi zkonstruovat řídicí systém, který pomocí potenciometrů nebo PC přes program Freemaster umožňuje ovládání výstupní amplitudy napětí a výstupní frekvence střídače. Řídicí systém umožňuje také nastavení skalárního řízení asynchronního motoru, měření napětí v meziobvodu a měření proudů ve dvou výstupních fázích, ze kterých následně vypočítá amplitudu proudu pomocí transformace T3/2.

Při realizaci řídicího systému jsem se potýkal s problémem, který zapříčinil potíže při měření napětí v meziobvodu a proudu ve výstupních fázích. Problém se nacházel na výkonové jednotce střídače, ze které jsem používal zdroj  $\pm 15$  V pro napájení operačních zesilovačů. Docházelo ke kmitání napájecího napětí a tím i kmitání měřeného napětí a proudu. Dále se objevil problém, kvůli kterému měl asynchronní motor nepravidelný chod. Příčina byla v tom, že během přerušení pro výpočet PWM docházelo k přerušení pro obnovu displeje, a tím nedocházelo k úplnému výpočtu PWM. Tyto komplikace byly odstraněny s pomocí vedoucího práce.

V závěrečné části byla ověřována funkčnost řídicího systému. K ověření funkčnosti bylo potřeba připojit řídicí systém k výkonové jednotce střídače a ke střídači připojit asynchronní motor. Potom jsem pomocí třífázového analyzátoru harmonických měřil první harmonickou výstupního napětí, výstupní efektivní hodnotu napětí a proudu při změnách výstupní frekvence. Toto měření jsem prováděl také při ověření funkčnosti skalárního řízení. Změřené hodnoty jsem vynesl do grafů. Současně jsem pomocí osciloskopu měřil průběhy výstupního napětí a proudu. Měřením byla ověřena funkčnost řídicího systému.

Řídicí systém by mohl být ještě doplněn možností nastavení vektorového řízení, větším LCD displejem, aby bylo možné zobrazit i vypočtenou amplitudu proudu, a řízením třetí harmonickou.



## Použitá literatura






- [1] VONDRAŠEK, František. *Výkonová elektronika - svazek III* vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1998. ISBN 80-7082-485-9
- [2] CHLEBIŠ, Petr. *Výkonová elektronika I*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2003.
- [3] JAVŮREK, Jiří. *Regulace moderních elektrických pohonů* 1. vyd. Praha: Grada, 2003. ISBN 80-247-0507-9.
- [4] MC56F8037 - dokumentace k vývojovému kitu firmy Freescale [online]. [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: [www.nxp.com](http://www.nxp.com)
- [5] KOŘENÝ, Lukáš. *Výkonová jednotka trojfázového střídače* [online]. Ostrava, 2015 [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/108767>. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská, Fakulta elektrotechniky a informatiky, KAT430. Vedoucí práce Doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
- [6] MEAN WELL RS-15-5 - dokumentace ke spínanému zdroji firmy MEAN WELL [online]. [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: [www.meanwell.com](http://www.meanwell.com)
- [7] LF33CV - dokumentace k napěťovému regulátoru firmy STMicroelectronics [online]. [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: [www.st.com](http://www.st.com)
- [8] NMTC-S16205DFGHSAY dokumentace k LCD displeji firmy Mouser electronics [online]. [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: [www.mouser.com](http://www.mouser.com)
- [9] BC807 - dokumentace k PNP tranzistoru firmy NXP Semiconductor [online]. [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: [www.nxp.com](http://www.nxp.com)
- [10] HCPL 2531 - dokumentace k optočlenu firmy Avago Technologies [online]. [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: [www.avagotech.com](http://www.avagotech.com)
- [11] TLV431 - dokumentace k napěťové referenci firmy Texas Instruments [online]. [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: [www.ti.com](http://www.ti.com)

## Seznam příloh

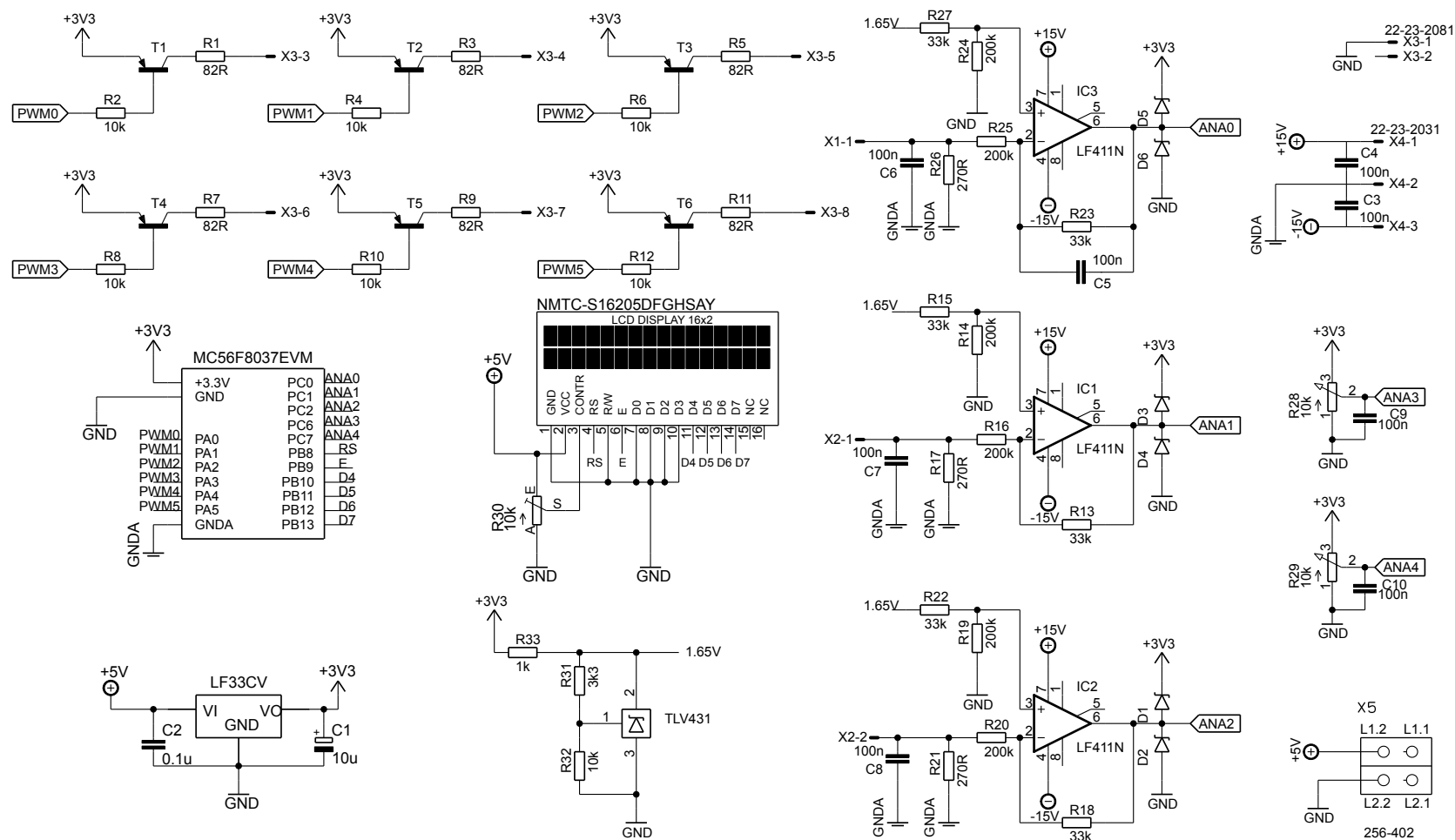
Příloha A:	Schéma zapojení řídicího systému .....	I
Příloha B:	Deska plošných spojů řídicího systému .....	II
Příloha C:	Řídicí systém s připojeným vývojovým kitem MC56F8037EVM.....	III
Příloha D:	Seznam součástek.....	IV

Příloha na CD.

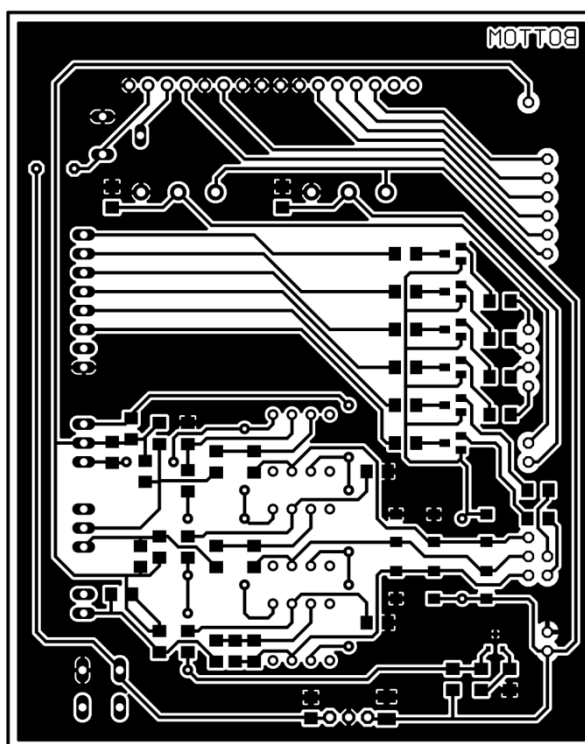
Adresářová struktura přiloženého CD:

-  Bakalářská práce pdf
-  Codewarrior
-  Datasheets
-  Eagle
-  Fotky

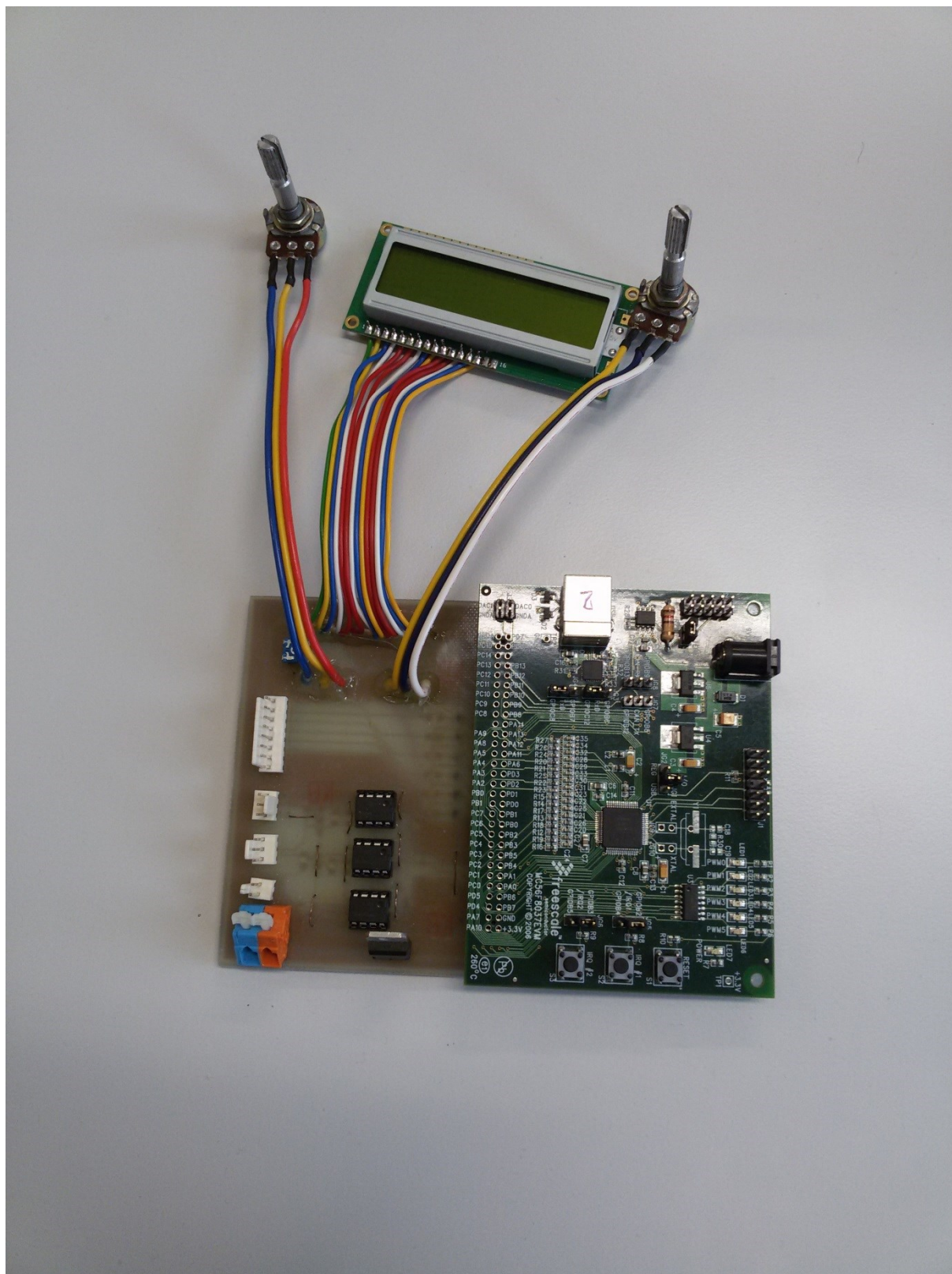
Příloha A: Schéma zapojení řídicího systému



Příloha B:     *Deska plošných spojů řídicího systému*



Příloha C:      *Řídicí systém s připojeným vývojovým kitem MC56F8037EVM*



Příloha D:     *Seznam součástek*

Název	Hodnota	Kusů
Elektrolytický kondenzátor SMD_B	10 $\mu$ F	1
Keramický kondenzátor 1206	100 nF	9
Konektor se zámkem PSH02-02PG	-	1
Konektor se zámkem PSH02-03PG	-	2
Konektor se zámkem PSH02-08PG	-	1
LCD Displej 16x2 NMTC-S16205DFGHSAY	-	1
Napěťová reference TLV431	-	1
Oboustranný kolík 2,56 mm	-	20
Operační zesilovač LF411N	-	3
Potenciometr lineární	10 k $\Omega$	2
Pružinová svorkovnice WAGO 256-744	-	2
Regulátor napětí LF33CV	-	1
Rezistor SMD 1206	82 $\Omega$	6
Rezistor SMD 1206	270 $\Omega$	3
Rezistor SMD 1206	1 k $\Omega$	1
Rezistor SMD 1206	3,3 k $\Omega$	1
Rezistor SMD 1206	10 k $\Omega$	7
Rezistor SMD 1206	33 k $\Omega$	6
Rezistor SMD 1206	200 k $\Omega$	6
Schottkyho dioda BAT42 SMD	-	6
Tranzistor PNP BC807	-	6
Trimr CA6VKO10	10 k $\Omega$	1
Vývojový kit MC56F8037EVM	-	1